

Trabajo Fin de Máster

Máster en Ingeniería de Caminos, Canales y
Puertos

APLICACION DE REALIDAD VIRTUAL PARA EL ANALISIS DE SEGURIDAD VIAL DE CARRETERAS CON MODELOS BIM

Autor: D. Manuel M^a Benavente Lepe

Tutor: D. Blas González González

Cotutor: D. Francisco García Romero

Dpto. Construcciones Arquitectónicas I
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2021



Departamento de
Construcciones
Arquitectónicas 1

Trabajo Fin de Máster
Máster en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

APLICACION DE REALIDAD VIRTUAL PARA EL ANALISIS DE SEGURIDAD VIAL DE CARRETERAS CON MODELOS BIM

Autor:

D. Manuel M^a Benavente Lepe

Tutor:

D. Blas González González

Profesor Asociado

Cotutor:

D. Francisco García Romero

Dpto. de Construcciones Arquitectónicas I

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2021

Trabajo Fin de Máster: APLICACION DE REALIDAD VIRTUAL PARA EL ANALISIS DE SEGURIDAD
VIAL DE CARRETERAS CON MODELOS BIM

Autor: D. Manuel M^a Benavente Lepe

Tutores: D. Blas González González
D. Francisco García Romero

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2021

El Secretario del Tribunal

A mis padres, Ana y Manuel

A mi hermana

A mis amigos

Agradecimientos

Tras estos últimos años llenos de cambios y aprendizaje llega el momento de cerrar esta etapa, conservando la misma ilusión que me acompañó desde el principio.

En primer lugar, darle las gracias a mis padres, Ana y Manuel y a mi hermana, Ana por todos los momentos difíciles que hemos superado juntos, porque una familia como la nuestra jamás se da por vencida y siempre sigue adelante. A mi madre, Ana, la persona más fuerte que conozco, por ser un apoyo fundamental, por darme fuerzas en los momentos de flaqueza y acompañarme, por cuidar siempre de nuestra familia, por enseñarme con los hechos el significado del respeto, la educación y hacerme mejor persona. A mi padre, Manuel, por su valentía y fortaleza para seguir siempre adelante aunque la vida se ponga difícil, nada puede con nosotros. Y por supuesto, a mi hermana, Ana, por su alegría, sus ganas de vivir, su sonrisa... y por hacerme partícipe de todo ello, me siento muy afortunado y orgulloso de poder decir que soy tu hermano. Muchas gracias a vosotros, por estar siempre y ser mi refugio.

A mis amigos, en especial a Fernando por estar ahí en los momentos difíciles y acompañarme en los momentos felices, desde casi siempre y para siempre. Nos quedan muchas historias por vivir.

A mis amigos y compañeros del Máster, Alejandra, Carlos, Jordan... por compartir tantas alegrías juntos que, sin duda, superan a todas las penas.

A mis amigos del Grado, Pablo, Riki, Cayetano, Víctor... y especialmente a Dani porque aunque el tiempo pase seguís estando presentes, sin que nada haya cambiado.

A **D. Alejandro Jiménez-Espada González**, jefe del Servicio de Proyección y Supervisión, por su apoyo decidido a la introducción de las innovaciones tecnológicas en materia BIM en la administración de carreteras de la Junta de Andalucía, y por facilitar la ejecución de este trabajo.

A **D. Moisés Barea Solís**, por su inestimable aportación de ideas y de datos de necesarios para realizar este trabajo.

A **D.ª Cristina Torrecillas Lozano**, Profesora Titular de la Universidad de Sevilla, por su ayuda y apoyo en la etapa más difícil de este proyecto y aconsejarme desde su experiencia.

A **D. Francisco García Romero**, Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, por sus horas en la co-tutoría de este TFM que han permitido llevar a cabo este proyecto.

A **D. Blas González González**, Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos y tutor de este TFM, por su carácter innovador insaciable y apoyarme en mis ideas. Tras acompañarme durante el TFG, volvemos a cerrar esta etapa juntos. Gracias por las horas dedicadas y por transmitirme la visión práctica y el conocimiento que aporta la experiencia.

Gracias a todos los que formaron parte de esta bonita etapa, nunca lo olvidaré. La alegría por ver cómo los sueños y objetivos se cumplen con esfuerzo, constancia y sacrificio es indescriptible.

*Manuel
Ingeniero Civil
Sevilla, 2021*

Resumen

En el presente Trabajo Fin de Máster se desarrolla un entorno virtual a partir de nubes de puntos aplicando la tecnología de la Realidad Virtual. En concreto, este estudio aborda la representación gráfica de infraestructuras de carreteras y la propuesta de desarrollo de una herramienta que permita el análisis de seguridad vial. El principal propósito es establecer las bases para futuros trabajos de investigación sobre la aplicación de esta tecnología en el sector AEC.

En cuanto al contenido del estudio, se comienza con la investigación sobre el estado del arte de la tecnología del levantamiento topográfico mediante nube de puntos. Para ello, se estudian los diferentes equipos técnicos (RPA, Escáner láser...) y tecnologías (fotogrametría, LiDAR) que permiten generar una nube de puntos. Posteriormente, se analiza el flujo de trabajo con una nube de puntos, comenzando con los trabajos previos y finalizando con el análisis y tratamiento de la información recogida.

Continuando con la segunda línea de investigación, la digitalización de la realidad, se realiza una investigación sobre las diferentes técnicas disponibles (Realidad Virtual, Realidad Aumentada y Realidad Mixta), concluyendo que la Realidad Virtual (RV) es una técnica de utilidad para este estudio. Desarrollando la investigación sobre esta tecnología, se exponen diferentes equipos y softwares para su aplicación.

Posteriormente, se da paso al análisis del caso de estudio el cual comienza con la descripción del tramo de interés mediante un reportaje fotográfico, para así continuar con el control de calidad de la nube de puntos ofrecida por la **Dirección General de Infraestructuras de la Consejería de Fomento, Infraestructuras y Ordenación del Territorio de la Junta de Andalucía**. Más tarde, se genera el entorno virtual y se cierra este apartado con un análisis cualitativo de la seguridad vial en el tramo estudiado.

A continuación, se establecen las bases para el desarrollo de futuros trabajos de investigación mediante la propuesta de una herramienta para el análisis de seguridad vial empleando el entorno virtual generado en el caso práctico.

Por último, se finaliza el trabajo con la exposición de las futuras líneas de investigación y las conclusiones obtenidas del presente TFM con respecto a las nubes de puntos, la Realidad Virtual y sus numerosas aplicaciones en el sector AEC.

Palabras clave

Nube de puntos, Escáner láser, Realidad Virtual, BIM civil, Carretera Virtual

Abstract

This Master's thesis develops a virtual environment based on point clouds by applying Virtual Reality technology. Specifically, this study deals with the graphical representation of road infrastructures and the proposed development of a tool for road safety analysis. The main purpose is to establish the basis for future research work on the application of this technology in the AEC sector.

The content of the study begins with research into the state of the art in point cloud surveying technology. To this end, the different technical equipment (RPA, laser scanners, etc.) and technologies (photogrammetry, LiDAR) that enable a point cloud to be generated are studied. Subsequently, the workflow with a point cloud is analysed, starting with the preliminary work and ending with the analysis and processing of the information collected.

Continuing with the second line of research, the digitisation of reality, the different techniques available (Virtual Reality, Augmented Reality and Mixed Reality) are investigated, concluding that Virtual Reality (VR) is of great use in this study. Investigating this technology in more detail, different equipment and software for its application are analysed.

This is followed by the analysis of the case study. It begins with the description of the section of interest with a photographic report, to continue with the quality control of the point cloud provided by *La Dirección General de Infraestructuras de la Consejería de Fomento, Infraestructuras y Ordenación del Territorio de la Junta de Andalucía*. Later, the virtual environment is generated and this section closes with a qualitative analysis of road safety on the section studied.

The basis for future research work is then established by proposing a road safety analysis tool based on the virtual environment generated in the case study.

Finally, the work ends with a presentation of future lines of research and the conclusions obtained from this TFM on point clouds, Virtual Reality and its numerous applications in the AEC sector.

Keywords

Point Cloud, Laser scanner, Virtual Reality, BIM civil, Virtual Road

Índice

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Abstract	xiii
Índice	xv
Índice de Tablas	xvii
Índice de Figuras	xix
Notación	xxiii
1 Objetivo y alcance	1
1.1 <i>Objetivos</i>	2
1.2 <i>Justificación</i>	2
1.3 <i>Estructura del Trabajo</i>	3
2 Referencias Bibliográficas	5
2.1 <i>Trabajos académicos</i>	5
2.2 <i>Producción científica</i>	6
3 Nube de puntos para modelos BIM de carreteras	11
3.1 <i>Equipos Técnicos</i>	11
3.2 <i>Trabajos previos para la realización de la Nubes de Puntos</i>	13
3.3 <i>Postratamiento de la captura de datos</i>	15
3.3.1 <i>Faro Scene</i>	16
3.3.2 <i>Leica Cyclone</i>	17
3.3.3 <i>ReCap Pro</i>	17
3.3.4 <i>Análisis Comparativo de las herramientas informáticas</i>	18
4 Levantamiento topográfico con escáner láser	21
4.1 <i>La tecnología LiDAR</i>	21
4.2 <i>Tipos de escáner láser</i>	22
4.3 <i>Características</i>	25
4.4 <i>Levantamiento topográfico para el caso de estudio</i>	29
5 La digitalización de la realidad	31
5.1 <i>Tipos de digitalización de la realidad física</i>	31
5.1.1 <i>Realidad virtual</i>	32
5.1.2 <i>Realidad aumentada</i>	32
5.1.3 <i>Realidad mixta</i>	33
5.1.4 <i>Conclusión</i>	34
5.2 <i>Equipos de Realidad Virtual</i>	34
5.3 <i>Softwares de Realidad Virtual</i>	36
6 El Caso de Estudio	39
6.1 <i>Descripción el tramo de estudio</i>	40
6.2 <i>Descripción de la nube de puntos</i>	49

6.3	<i>Control de calidad de la nube de puntos</i>	55
6.4	<i>Generación de la superficie 3D</i>	65
6.5	<i>Creación del entorno virtual</i>	69
6.6	<i>Análisis cualitativo de la Seguridad Vial</i>	71
6.6.1	Zona de visibilidad reducida en la calzada en sentido creciente	71
6.6.2	Zona de visibilidad reducida en la calzada en sentido decreciente	73
6.6.3	Zona de visibilidad reducida en intersección	75
6.6.4	Efecto de la posición del sol	76
6.6.5	Conclusión	77
7	Propuesta de herramienta RV-SegVial	79
7.1	<i>Antecedentes</i>	80
7.2	<i>Cálculo de distancias a objetos</i>	82
7.3	<i>Simulación de tráfico</i>	86
7.4	<i>Interacción con la señalización vertical</i>	87
8	Conclusiones y Líneas de trabajo	89
8.1	<i>Conclusiones</i>	89
8.2	<i>Líneas de trabajo</i>	90
9	Referencias	93
10	Anexos	99
10.1	<i>Situación</i>	101
10.2	<i>Información gráfica del Caso Estudio</i>	105
10.3	<i>Escáner Láser</i>	111
10.4	<i>Arquitectura de la Herramienta RV-SegVial</i>	115
10.5	<i>Herramienta UNREAL ENGINE</i>	119
10.5.1	Descarga	119
10.5.2	Inicio	120

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3-1- Requisitos técnicos recomendados	20
Tabla 4-1- LOD según GSA, tolerancia y resolución. Fuente: [17]	26
Tabla 4-2- Inventario de archivos aportados	29
Tabla 6-1- Características del equipo empleado	40
Tabla 6-2- Error relativo	58
Tabla 6-3- Localización representativa del tramo de estudio	69

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3-1- Ejemplo RPA. Dji Phantom 3 Standard. Fuente: [56]	11
Figura 3-2- Estatua a Blas Infante en Plaza de Blas Infante, Villarrasa (Huelva).	12
Figura 3-3- Mapa de limitaciones por motivos de espacio aéreo, Andalucía. Fuente: [59]	13
Figura 3-4- Vehículo capturado por la nube de puntos.	15
Figura 3-5- Escáner Leica BLK360. Fuente: [64]	17
Figura 3-6- Ejemplo Nube de Puntos en <i>ReCap Pro</i> . Fuente: [67]	18
Figura 3-7- Generación de elementos de forma automática con <i>Leica Cyclone</i> . Fuente: [65]	19
Figura 4-1- Tecnología LiDAR. Fuente: [75]	22
Figura 4-2- Clasificación del escáner láser	23
Figura 4-3- Esquema de la tecnología de tiempo de vuelo. Fuente: [77]	23
Figura 4-4- Esquema de la técnica de diferencia de fase. Fuente: [72]	24
Figura 4-5- Esquema de la tecnología de triangulación láser. Fuente: [78]	24
Figura 4-6- Escáner láser 3D Leica RTC360. Fuente: [79]	25
Figura 4-7- Escáner láser Leica Pegasus: Two. Fuente: [80]	25
Figura 4-8- Impacto de la resolución en la información geométrica adquirida. Fuente: [18]	28
Figura 4-9- Nube de puntos de la A-474 desde Pk 49+700 hasta 50+800	30
Figura 4-10- Imagen panorámica en el tramo de estudio	30
Figura 5-1- Ejemplo práctico de Realidad Aumentada. Fuente: Realidad en aumento, [81]	33
Figura 5-2- Aplicación de la tecnología de Realidad Mixta. Fuente: [86]	34
Figura 5-3- Equipo de gafas RV Oculus Quest 2. Fuente: [87]	35
Figura 5-4- Equipo de gafas RV Google Cardboard. Fuente: [88]	36
Figura 6-1- Inicio del tramo	41
Figura 6-2 Ejemplo de intersección presente en el tramo de estudio	42
Figura 6-3- Aforos en la Red de Carreteras de Andalucía, 2019. Fuente: [90]	42
Figura 6-4- Ejemplo de señalización vertical en el tramo de estudio	43
Figura 6-5- Presencia de arena en la calzada	44
Figura 6-6- Presencia de arena en la calzada	44
Figura 6-7- Estado de la cuneta. Presencia de elementos sólidos.	45
Figura 6-8- Estado de la cuneta. Aterramiento	46
Figura 6-9- Estado de la cuneta. Presencia de vegetación	46
Figura 6-10- Primer punto de baja visibilidad	47
Figura 6-11- Segundo punto de baja visibilidad	48

Figura 6-12- Nubes de puntos A-474	49
Figura 6-13- A-474. Fuente: Google Earth Pro	49
Figura 6-14- Trayectoria del rayo láser	50
Figura 6-15- Nube de puntos A-474	51
Figura 6-16- Línea eléctrica captada por el escáner láser	51
Figura 6-17- Tramo sin información geométrica	55
Figura 6-18- Espacio entre puntos en la dirección del eje de la calzada	56
Figura 6-19- Primera medida	56
Figura 6-20- Segunda medida	57
Figura 6-21- Tercera medida	58
Figura 6-22- Flujo de trabajo 1	65
Figura 6-23- Flujo de trabajo 2	65
Figura 6-24- Modelo 3D con <i>Infraworks</i>	66
Figura 6-25- Modelo 3D con MeshLab	67
Figura 6-26- Nube de puntos editada	67
Figura 6-27- Superficie escalonada	68
Figura 6-28- Superficie simplificada y suavizada	68
Figura 6-29- Modelo 3D en <i>Infraworks</i>	69
Figura 6-30- Escena en tercera persona	70
Figura 6-31- Escena en primera persona	70
Figura 6-32- Punto de baja visibilidad. Pk 49+815 Sentido creciente	71
Figura 6-33- Punto de baja visibilidad. Pk 49+815 Sentido creciente. Primera persona	72
Figura 6-34- Esquema	72
Figura 6-35- Visibilidad entrada a la glorieta. Pk 50+700 Sentido creciente.	73
Figura 6-36- Visibilidad en la glorieta. Pk 50+700 Sentido creciente. Primera persona	73
Figura 6-37- Punto de baja visibilidad. Pk 50+050 Sentido decreciente	74
Figura 6-38- Punto de baja visibilidad. Pk 50+050 Sentido decreciente. Primera persona	74
Figura 6-39- Punto de baja visibilidad. Pk 50+410 Sentido decreciente	75
Figura 6-40- Punto de baja visibilidad. Pk 50+410 Sentido decreciente. Primera persona	75
Figura 6-41- Visión del conductor en sentido decreciente	76
Figura 6-42- Visión del conductor en sentido creciente	76
Figura 6-43- Posición del sol a las 9:00 el día 25/07 en sentido decreciente	77
Figura 7-1- Diagrama de flujo de la herramienta propuesta	79
Figura 7-2- Vista oculta en una pendiente: (a) perfil vertical de la carretera; (b) vista frontal en 3D de la carretera. Fuente: [41]	80
Figura 7-3- Vista 3D con líneas de visión obstruidas. Fuente: [41]	81
Figura 7-4- Descripción del método presentado. Fuente: [41]	82
Figura 7-5- Visibilidad de decisión o de parada	83

Figura 7-6- Visibilidad de cruce. Fuente: [93]	84
Figura 7-7- Diagrama de flujo. Cálculo de distancias a objetos.	84
Figura 7-8- Ejemplo de malla simple (izquierda) y compleja (derecha)	85
Figura 7-9- Diagrama de flujo. Cálculo de distancia entre vehículos.	85
Figura 7-10- Diagrama de flujo. Simulación del tráfico.	86
Figura 7-11- Diagrama de flujo. Interacción con señalización vertical.	88
Figura 10-1- Modelo escáner láser IP-S3 HD1. Fuente: [97]	111
Figura 10-2- Plataforma de un sistema de escáner láser móvil (<i>Topcon IP-S3 HD 3D mobile mapping system</i>). Fuente: [23]	113
Figura 10-3- <i>Epic Games Launcher</i>	119
Figura 10-4- Creación de un nuevo proyecto en <i>Unreal Engine 4</i>	120
Figura 10-5- Ajustes del proyecto en <i>Unreal Engine 4</i>	121

Notación

TFM	Trabajo Fin de Máster
BIM	Building Information Modeling
RPA	Aeronave no tripulada operada mediante control remoto (Remotely Piloted Aircraft)
LiDAR	Laser Imaging Detection and Ranging
RV/VR	Realidad Virtual (Virtual Reality)
AR	Realidad Aumentada (Augmented Reality)
MR	Realidad Mixta (Mixed Reality)

1 OBJETIVO Y ALCANCE

La realidad física siempre será superior a la realidad virtual, pero esta será en breves fechas una de las herramientas imprescindibles en la ingeniería civil.

- Blas González -

El siguiente documento, titulado ‘*APLICACION DE REALIDAD VIRTUAL PARA EL ANALISIS DE SEGURIDAD VIAL DE CARRETERAS CON MODELOS BIM*’ se enmarca dentro de la normativa referente al Trabajo de Fin de Master de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad de Sevilla, para la obtención de los créditos ECTS correspondientes de la titulación de MÁSTER EN INGENIERÍA DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS, por parte del alumno **D. Manuel M. Benavente Lepe**, que ha cursado en dicha escuela los estudios requeridos en la referida titulación, y tiene como objetivo último mostrar una parte de las capacidades profesionales que dichos estudios universitarios le han permitido adquirir.

Este Trabajo de Fin de Master está dentro de la línea de investigación en materia de **Construcción Digital aplicada a la Ingeniería Civil** que está desarrollando el Departamento de CONSTRUCCIONES ARQUITECTÓNICAS I, siendo el **tutor de este trabajo**, el ingeniero de caminos, canales y puertos D. Blas González González, profesor del Departamento, que imparte la docencia de varias asignaturas del Grado de Ingeniería Civil y del Máster de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos, e investigador en la aplicación de la tecnología BIM en materia de construcciones civiles; y su **cotutor** el ingeniero de caminos, canales y puertos D. Francisco García Romero, profesor colaborador de dicho Departamento y especialista BIM en materia de ingeniería civil, de reconocido prestigio profesional.

Las nuevas tecnologías de construcción digital (*Modelos BIM, Realidad Virtual, Realidad Aumentada, Inteligencia Artificial aplicada a los datos de obra, etc.*) están permitiendo la transición digital de la ingeniería civil desde el actual nivel de tecnología CAD hasta un nivel superior de excelencia en la gestión de la información de la construcción, y esto va a constituir un hecho diferencial de cómo los profesionales de la ingeniería civil ejerzan sus trabajos ordinarios.

Ante estas necesidades de **demanda formativa** de los nuevos profesionales de la ingeniería civil, el **Grupo BIM Civil** del Departamento de Construcciones Arquitectónicas I de la Universidad de Sevilla, se ha fijado entre sus objetivos implantar la enseñanza de la construcción digital en las asignaturas de las cuales es responsable en su docencia, y fruto de esa línea de trabajo se enmarca la investigación acometida en el desarrollo de este Trabajo Fin de Máster.

El objeto de este trabajo es investigar sobre la **aplicación de la realidad virtual a los análisis de la seguridad vial mediante modelos BIM de carreteras**, fijando la necesaria **estrategia de formulación de la digitalización de la realidad** de estas para así realizar el estudio de las variables que intervienen en la seguridad vial mediante la utilización de los modelos BIM que faciliten tanto el diseño como el estudio de la gestión y mantenimiento de la red viaria.

1.1 Objetivos

Para el presente Trabajo Fin de Máster se fijaron por los tutores de este los siguientes **objetivos principales**:

- i. Realizar una revisión bibliográfica estructurada sobre la **realidad virtual aplicada a la tecnología BIM**, completada con la **técnica de captura de información mediante láser escáner** para la **modelización tridimensional** (Modelo 3D) de las carreteras.
- ii. Realizar un **modelo virtual de la carretera** que, partiendo de una nube de puntos obtenida previamente, permita aplicar las técnicas de **realidad virtual** a una carretera.
- iii. Proponer una **metodología para realizar una herramienta de simulaciones de tráfico para análisis de seguridad vial** basándonos en la **realidad virtual** para su uso tanto en **fase de proyecto** como en la **fase de explotación** en las redes de carretera.

Que se han completado con otros de carácter **secundario**, necesarios para la correcta comprensión de estos, y que son:

- a) Analizar la **caracterización de las nubes de puntos** obtenidas por medios automáticos en carreteras, y evaluar la calidad de datos obtenidos con medidas reales a pie de carretera.
- b) Realizar un **caso estudio de un tramo de carretera del Red de Carreteras de Andalucía**, que permita explorar las capacidades de la realidad virtual para la simulación del tráfico en base al escaneo láser de la realidad y del modelado geométrico tridimensional de la superficie de la calzada y de su entorno incluida la señalización vertical, para la obtención de un prototipo de **gemelo digital de la carretera**.

1.2 Justificación

Este trabajo queda justificado por la creciente demanda de conocimiento de la **Digitalización de la realidad** y de la **tecnología BIM** aplicada a la Ingeniería Civil que se está produciendo en España en el ámbito del sector desde las administraciones públicas hasta las empresas de consultoría y las empresas de construcción. Por tanto, este trabajo pretende dar respuesta a la ausencia de formación reglada dentro de la titulación que permita a otros estudiantes de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos, así como a otros investigadores, ampliar el campo de aplicación de estas dos innovaciones tecnológicas en la construcción y gestión de las obras civiles, y en especial a las infraestructuras viarias.

Además, ante un contexto laboral tan competitivo como el actual, la innovación de la transformación digital en las empresas emerge como uno de los temas de investigación más tratados por investigadores, tanto nacionales como internacionales, con el fin de poder encontrar soluciones para hacer frente a los incesantes cambios del entorno.

No es nueva la técnica de la digitalización de la realidad física. En este sentido los simuladores de vuelo para hacer prácticas por parte de los pilotos de aviación comercial o militar ya utilizaron estas técnicas de simulación de la realidad, llevándose a su divulgación popular en 1.982 con la pionera película TRON

que nos introdujo en el mudo de la realidad digital, y estando plenamente integrada en la industria del videojuego. En cambio, en la nueva etapa que se ha iniciado con el decidido impulso de la Unión Europea para la transformación digital en la agenda 2030, la infraestructura 4.0 necesita de integrar la realidad virtual y la tecnología BIM para poder hacer análisis de varios tipos entre ellos el de la seguridad vial en las carreteras.

1.3 Estructura del Trabajo

El presente trabajo comenzará con una **revisión de los antecedentes** realizados en otras escuelas de ingeniería de las universidades españolas en relación con la realidad virtual realizada aplicada al modelado BIM de carreteras en el cual se ha utilizado el escaneado láser.

A continuación, en el capítulo 3 se introducirá al lector en las **nubes de puntos** a fin de tener un conocimiento de sus características de estas y así poder dictaminar sobre **criterios de calidad** en el caso de escaneado láser de carreteras.

En el capítulo 4 se presenta un estado del arte sobre el **levantamiento topográfico mediante escaneado láser**. Con esta técnica se analiza un entorno u objeto real para tomar datos sobre su forma y, posiblemente, su apariencia. Dicho conocimiento es necesario para poder realizar la parte práctica de este TFM sobre el tramo de la carretera A-474.

Para alcanzar el segundo objetivo principal, se desarrolla en el capítulo 5 *La digitalización de la realidad*, el estudio sobre las técnicas existentes sobre cómo producir una realidad digital basándose en la realidad física, el cual nos permitirá incluirnos en ella para poder realizar allí las acciones que podemos ejecutar en la realidad física, pero sin producir daños al estar en un estado virtual.

Todo ello permite en el capítulo 6 *El Caso de Estudio* exponer los trabajos realizados de modelado digital de la superficie de la infraestructura señalada más arriba, partiendo de una nube de puntos para la creación del entorno virtual de la carretera que era el segundo objetivo principal. Se finaliza el capítulo con un análisis cualitativo de la seguridad vial en el tramo de carretera del caso estudio, pero realizando la simulación de conducción de forma manual.

Para alcanzar el tercer objetivo principal, en el capítulo 7 *Propuesta de herramienta RV-SegVial* se han desarrollado los trabajos de aproximación a la arquitectura de la herramienta informática para el análisis de la seguridad vial. El desarrollo completo de la herramienta es un trabajo complejo multidisciplinar que dado el tiempo limitado de este TFM no puede ser abordado, pero que puede ser desarrollado mediante un proyecto de investigación de gran calado.

Además, se presentará un penúltimo capítulo de “Conclusiones y Líneas de trabajo” donde se recogerán las conclusiones del presente estudio, así como a la vista de los resultados obtenidos en esta investigación posibles líneas de trabajo que amplíen el conocimiento sobre los aspectos contemplados en el mismo.

Terminando en un capítulo de Referencias Bibliográficas utilizadas en los estudios realizados para la elaboración de este trabajo.

En el apartado de **Anexos**, el lector se encontrará con un plano de situación del tramo estudiado en el caso práctico, información gráfica resultante de los trabajos, datos técnicos del escáner láser empleado, un esquema de la arquitectura de la propuesta de herramienta informática RV-SegVial y una introducción a la herramienta de realidad virtual utilizada en el desarrollo del caso estudio.

2 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

En este capítulo se detalla los trabajos sobre el objeto del TFM, que han servido de base para el análisis de las características de los levantamientos topográficos mediante nubes de puntos, el modelado BIM de carreteras y la digitalización de la realidad tanto virtual, aumentada o mixta.

2.1 Trabajos académicos

A continuación, se citan los trabajos académicos, tanto Trabajos Fin de Grado como Trabajos Fin de Máster, consultados para el desarrollo del presente estudio. En cuanto a los filtros aplicados en la búsqueda, se establecen como tópicos la Realidad Virtual y nubes de puntos.

En primer lugar, se señalan aquellos que tratan sobre el levantamiento topográfico empleando nubes de puntos:

- [1] F. Javier, “Comparativa entre software propietario y Superior de levantamientos Ingeniería libre en fotogramétricos con RPAs,” 2020.
- [2] M. G. Domínguez, “De nube de puntos a BIM. Caso práctico: Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, Braunschweig,” 2020.
- [3] A. Marfil Cita, “Detección de la línea de costa gaditana mediante datos de imágenes satélite SAR y LiDAR,” 2020.
- [4] D. Seda and C. T. Lozano, “Inspección de puentes con infrarrojos,” 2016.

En segundo lugar, se señalan aquellos que tratan sobre la tecnología de la Realidad Virtual:

- [5] M. López Menárguez, “Entorno 3D en Unreal Engine 4,” 2018.
- [6] M. Ojanguren and M. C. Hernández, “Realidad virtual en la ingeniería civil. Virtualización de una obra,” 2016.
- [7] M. Á. Guillén Belmonte and D. Ojados González, “Realidad virtual para la mejora de los planes de autoprotección. Recorrido virtual en el edificio Casa del Estudiante de la UPCT,” 2020.
- [8] C. Lorenzo, “REALIDAD VIRTUAL APLICADA A LA INGENIERÍA CIVIL. ESTUDIO DE APLICACIÓN DE SISTEMAS DE VISUALIZACIÓN Y ANOTACIÓN INTERACTIVA EN INFRAESTRUCTURAS CIVILES,” 2017, [Online]. Available: [https://riull.ull.es/xmlui/bitstream/handle/915/7003/Realidad virtual aplicada a la ingeniería civil. Estudio de aplicación de sistemas de visualización y anotación interactiva en infraestructuras civiles..pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://riull.ull.es/xmlui/bitstream/handle/915/7003/Realidad%20virtual%20aplicada%20a%20la%20ingenieria%20civil.%20Estudio%20de%20aplicacion%20de%20sistemas%20de%20visualizacion%20y%20anotacion%20interactiva%20en%20infraestructuras%20civiles..pdf?sequence=1&isAllowed=y).
- [9] A. Pérez Rodríguez, “Anotaciones de diseño en modelos BIM mediante entornos web, dispositivos

móviles y realidad virtual,” 2017.

- [10] O. E. Apolo Apolo, ““Recuperación, modelado y recreación utilizando fotogrametría, del Patrimonio Oleícola Industrial de la Hacienda de Quinto,”” vol. 1, p. 104, 2016, [Online]. Available: <https://idus.us.es/xmlui/handle/11441/58027>.

2.2 Producción científica

En cuanto a la producción de la comunidad científica en relación con las nubes de puntos y la Realidad Virtual aplicadas a la metodología BIM, se ha empleado la base de datos de la *Web of Science*. Además, también se recogen *papers* de conferencias, libros y la serie 3 de la Guía BIM de la *US General Services Administration*.

De igual forma que en el apartado anterior, se señalan primero aquellos documentos que tratan sobre el levantamiento topográfico empleando nubes de puntos:

- [11] G. Carapellese, J. C. García de Paredes, J. J. Martín-del-Río, A. Graciani-García, and E. Cabrera-Revuelta, “Evaluación de fortificaciones rurales de tapia mediante técnica SfM de fotogrametría digital. Aplicación metodológica al Castillo de Alhonoiz (Écija, España),” *Estoa*, vol. 9, no. 18, pp. 101–113, 2020, doi: 10.18537/est.v009.n018.a09.
- [12] E. Cabrera Revuelta and B. Molero Alonso, “Closerange photogrammetry. Previous works to the data collection,” *EGE-Expresión Gráfica en la Edif.*, pp. 33–44, 2016, doi: 10.4995/eg.2016.12458.
- [13] J. E. Nieto, J. J. Moyano, and P. Fernández-Valderrama, “Implementación de las nuevas técnicas de levantamiento en el sistema BIM (Building Information Modeling),” *XII Graph. Expr. Appl. to Build. Int. Conf. (APEGA 2014)*, pp. 104–113, 2014.
- [14] F. R. Delgado, “A novel approach to the management of point clouds derived from scanning and photogrammetry for the optimisation of printable 3D formats [Un nuevo enfoque en la gestión de nubes de...,” no. December, 2016.
- [15] J. Herráez Boquera, J. L. Denia Ríos, E. M. García García, and P. Navarro Esteve, “Aplicaciones del Láser Scanner a la ingeniería civil,” no. 1, p. 38, 2012.
- [16] R. Tomás, A. Riquelme, M. Cano, and A. Abellán, “Structure from Motion (SfM): una técnica fotogramétrica de bajo coste para la caracterización y monitoreo de macizos rocosos,” *10o Simp. Nac. Ing. Geotécnica, A Coruña, España*, vol. 1, no. 1, pp. 209–216, 2016.
- [17] GSA, “GSA Building Information Modeling Guide Series: 03 – GSA BIM Guide for 3D Imaging,” *Imaging*, no. January, 2009.
- [18] L. Sanhudo et al., “A framework for in-situ geometric data acquisition using laser scanning for BIM modelling,” *J. Build. Eng.*, vol. 28, no. August 2019, 2020, doi: 10.1016/j.job.2019.101073.
- [19] M. Weinmann, *Reconstruction and Analysis of 3D Scenes*. 2016.
- [20] D. Costantino, M. Pepe, and A. G. Restuccia, “Scan-to-HBIM for conservation and preservation of Cultural Heritage building: the case study of San Nicola in Montedoro church (Italy),” *Appl. Geomatics*, no. 2019, 2021, doi: 10.1007/s12518-021-00359-2.
- [21] Y. Pan and L. Zhang, “Roles of artificial intelligence in construction engineering and management: A critical review and future trends,” *Autom. Constr.*, vol. 122, no. November 2020, p. 103517, 2021, doi: 10.1016/j.autcon.2020.103517.
- [22] S. Pu and G. Vosselman, “Knowledge based reconstruction of building models from terrestrial laser scanning data,” *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, vol. 64, no. 6, pp. 575–584, 2009, doi: 10.1016/j.isprsjprs.2009.04.001.
- [23] B. Pradhan and M. I. Sameen, *Laser Scanning Systems in Highway and Safety Assessment Analysis of Highway Geometry and Safety Using LiDAR*. 2020.
- [24] L. Notes, *Advances in 3D Geoinformation Systems*. 2008.

- [25] Q. Wang and M. K. Kim, "Applications of 3D point cloud data in the construction industry: A fifteen-year review from 2004 to 2018," *Adv. Eng. Informatics*, vol. 39, no. September 2018, pp. 306–319, 2019, doi: 10.1016/j.aei.2019.02.007.
- [26] T. Mill, A. Alt, and R. Lias, "Combined 3D building surveying techniques-Terrestrial laser scanning (TLS) and total station surveying for BIM data management purposes," *J. Civ. Eng. Manag.*, vol. 19, no. SUPPL.1, pp. 23–32, 2013, doi: 10.3846/13923730.2013.795187.
- [27] P. Tang, D. Huber, B. Akinci, R. Lipman, and A. Lytle, "Automatic reconstruction of as-built building information models from laser-scanned point clouds: A review of related techniques," *Autom. Constr.*, vol. 19, no. 7, pp. 829–843, 2010, doi: 10.1016/j.autcon.2010.06.007.
- [28] M. Gregor and A. Tibaut, *Ontology based information creation approach for digital twins: Early-stage findings*, vol. 853. Springer International Publishing, 2020.
- [29] M. Pepe, D. Costantino, and A. R. Garofalo, "An efficient pipeline to obtain 3D model for HBIM and structural analysis purposes from 3D point clouds," *Appl. Sci.*, vol. 10, no. 4, 2020, doi: 10.3390/app10041235.
- [30] L. Barazzetti, R. Brumana, S. Della Torre, G. Gusmeroli, and G. Schiantarelli, "Point clouds turned into finite elements: The umbrella vault of Castel Masegra," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 364, no. 1, 2018, doi: 10.1088/1757-899X/364/1/012087.
- [31] J. Corso Sarmiento, A. Marco Bercero, J. Casals Fernandez, and P. Garcia-Almirall, "SCAN to BIM beyond a Final BIM: Why, When and How," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 603, no. 4, 2019, doi: 10.1088/1757-899X/603/4/042090.
- [32] M. K. Masood, A. Aikala, O. Seppänen, and V. Singh, "Multi-Building Extraction and Alignment for As-Built Point Clouds: A Case Study With Crane Cameras," *Front. Built Environ.*, vol. 6, no. December, 2020, doi: 10.3389/fbuil.2020.581295.
- [33] R. Romero-Jarén and J. J. Arranz, "Automatic segmentation and classification of BIM elements from point clouds," *Autom. Constr.*, vol. 124, no. February, 2021, doi: 10.1016/j.autcon.2021.103576.
- [34] X. Zhao, B. Kargoll, M. Omidalizarandi, X. Xu, and H. Alkhatib, "Model selection for parametric surfaces approximating 3d point clouds for deformation analysis," *Remote Sens.*, vol. 10, no. 4, 2018, doi: 10.3390/rs10040634.
- [35] C. Cabo, C. Ordoñez, S. García-Cortés, and J. Martínez, "An algorithm for automatic detection of pole-like street furniture objects from Mobile Laser Scanner point clouds," *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, vol. 87, pp. 47–56, 2014, doi: 10.1016/j.isprsjprs.2013.10.008.

A continuación, se exponen los documentos que tratan sobre la tecnología de la Realidad Virtual u otras relacionadas con ella:

- [36] Z. Wu, L. Wang, Z. Fu, L. Zhu, F. Dou, and P. Xu, "VR+BIM: Perception and Design Optimization of Highway," *Proc. - 8th Int. Conf. Virtual Real. Vis. ICVRV 2018*, pp. 164–165, 2018, doi: 10.1109/ICVRV.2018.00059.
- [37] H. Bahri, D. Krcmarik, R. Moezzi, and J. Kočí, "Efficient Use of Mixed Reality for BIM system using Microsoft HoloLens," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 52, no. 27, pp. 235–239, 2019, doi: 10.1016/j.ifacol.2019.12.762.

Como se puede observar, en la actualidad gran parte de los estudios realizados sobre las nubes de puntos versan sobre la automatización de procesos, reduciendo así el volumen de horas dedicadas por parte del usuario. Por otra parte, se puede ver que una aplicación donde las nubes de puntos adquieren una importancia vital es en la generación de modelos *As-built* o en la representación gráfica del patrimonio histórico, permitiendo crear un modelo BIM para su gestión.

Además, cabe destacar el proyecto PANDORA para el que se han reunido las empresas SACYR, ATyges y

Aplitop. Este proyecto engloba tanto el levantamiento topográfico empleando nubes de puntos como la aplicación de la Realidad Virtual. Tres características acreditan su capacidad y éxito: permitir el desarrollo de un sistema de navegación autónomo; hacer posible el desarrollo de una plataforma multisensorial de escaneo en movimiento e imagen de alta resolución y, por último, permitir el desarrollo de aplicaciones software basadas en realidad virtual y realidad aumentada [38].

Por último, atendiendo a la *Propuesta de herramienta RV-SegVial* que se realiza en el capítulo 7 del presente TFM, se recogen artículos que siguen esta línea de investigación.

- [39] C. De Santos-Berbel and M. Castro, "Three-Dimensional Virtual Highway Model for Sight-Distance Evaluation of Highway Underpasses," *J. Surv. Eng.*, vol. 144, no. 4, p. 05018003, 2018, doi: 10.1061/(asce)su.1943-5428.0000258.
- [40] G. Caroti and A. Piemonte, "Measurement of cross-slope of roads: Evaluations, algorithms and accuracy analysis," *Surv. Rev.*, vol. 42, no. 315, pp. 92–104, 2010, doi: 10.1179/003962610X12572516251484.
- [41] K. González-Gómez, L. Iglesias, R. Rodríguez-Solano, and M. Castro, "Framework for 3D point cloud modelling aimed at road sight distance estimations," *Remote Sens.*, vol. 11, no. 23, pp. 1–14, 2019, doi: 10.3390/rs11232730.
- [42] M. Castro and C. De Santos-Berbel, "Spatial analysis of geometric design consistency and roadsid distance," 2014.
- [43] M. Castro, J. A. Anta, L. Iglesias, and J. A. Sánchez, "GIS-Based System for Sight Distance Analysis of Highways," *J. Comput. Civ. Eng.*, vol. 28, no. 3, 2014, [Online]. Available: [https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)CP.1943-5487.0000317](https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000317).
- [44] M. Castro, L. Iglesias, J. A. Sánchez, and L. Ambrosio, "Sight distance analysis of highways using GIS tools," *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.*, vol. 19, no. 6, pp. 997–1005, 2011, doi: 10.1016/j.trc.2011.05.012.
- [45] J. Gong, H. Zhou, C. Gordon, and M. Jalayer, "Mobile terrestrial laser scanning for highway inventory data collection," *Congr. Comput. Civ. Eng. Proc.*, no. January 2015, pp. 545–552, 2012, doi: 10.1061/9780784412343.0069.
- [46] I. Abuhadrous, S. Ammoun, F. Nashashibi, F. Goulette, and C. Laurgeau, "Digitizing and 3D modeling of urban environments and roads using vehicle-borne laser scanner system," *2004 IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robot. Syst.*, vol. 1, pp. 76–81, 2004, doi: 10.1109/iros.2004.1389332.
- [47] A. Boyko and T. Funkhouser, "Extracting roads from dense point clouds in large scale urban environment," *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, vol. 66, no. 6 SUPPL., pp. S2–S12, 2011, doi: 10.1016/j.isprsjprs.2011.09.009.
- [48] S. I. El-Halawany and D. D. Lichti, "Detection of Road Poles from Mobile Terrestrial Laser Scanner Point Cloud," *Int. Work. Multi-Platform/Multi-Sensor Remote Sens. Mapp.*, 2011, [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5697364>.
- [49] S. I. El-Halawany and D. D. Lichti, "Detecting road poles from mobile terrestrial laser scanning data," *GIScience Remote Sens.*, vol. 50, no. 6, pp. 704–722, 2013, [Online]. Available: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/15481603.2013.866815>.
- [50] H. Fan, W. Yao, and L. Tang, "Identifying man-made objects along urban road corridors from mobile lidar data," *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.*, vol. 11, no. 5, pp. 950–954, 2014, doi: 10.1109/LGRS.2013.2283090.
- [51] H. Guan, J. Li, Y. Yu, Z. Ji, and C. Wang, "Using Mobile LiDAR Data for Rapidly Updating Road Markings," *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 16, no. 5, pp. 2457–2466, 2015, doi: 10.1109/TITS.2015.2409192.
- [52] J. Landa and D. Prochazka, "Automatic Road Inventory Using LiDAR," *Procedia Econ. Financ.*, vol. 12, no. March, pp. 363–370, 2014, doi: 10.1016/s2212-5671(14)00356-6.

- [53] P. Kumar, C. P. McElhinney, P. Lewis, and T. McCarthy, "An automated algorithm for extracting road edges from terrestrial mobile LiDAR data," *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, vol. 85, no. 2013, pp. 44–55, 2013, doi: 10.1016/j.isprsjprs.2013.08.003.
- [54] H. Wang *et al.*, "Automatic road extraction from mobile laser scanning data," *Proc. Int. Conf. Comput. Vis. Remote Sensing, CVRS 2012*, no. December, pp. 136–139, 2012, doi: 10.1109/CVRS.2012.6421248.
- [55] B. Yang, Z. Wei, Q. Li, and J. Li, "Automated extraction of street-scene objects from mobile lidar point clouds," *Int. J. Remote Sens.*, vol. 33, no. 18, pp. 5839–5861, 2012, doi: 10.1080/01431161.2012.674229.

3 NUBE DE PUNTOS PARA MODELOS BIM DE CARRETERAS

En la actualidad cada vez es más común encontrar nubes de puntos como bases cartográficas para los trabajos de diseño en proyectos de infraestructuras del transporte y en particular, de carreteras, para la realización de un análisis sobre el estado actual de una estructura, proyectos *As-built* o incluso para generar un modelo BIM de una estructura existente. Debido a la gran demanda de este mercado existen numerosos equipos técnicos con los que obtener una nube de puntos. Por ello, la oferta de softwares que permiten trabajar con estos archivos también ha crecido en los últimos años.

Para conocer más sobre esta tecnología, se analizarán a continuación diferentes equipos que permiten obtener una nube de puntos. Más tarde, se hablará sobre las diferentes consideraciones a tener en cuenta para obtener una nube de puntos de calidad. Una vez estudiados estos dos puntos, se finaliza este apartado con el estudio de los diferentes softwares para el tratamiento de la nube de puntos, así como sus formatos de salida.

3.1 Equipos Técnicos

Hoy en día el trabajo con nubes de puntos está alcanzando una gran importancia en muchos sectores, entre los que se encuentra el sector AEC. Es por ello por lo que las herramientas que permiten trabajar con esta tecnología son cada vez más accesibles y se ofrecen más alternativas. La variedad existente en el mercado es enorme, desde un **smartphone** hasta un escáner láser estático o un **escáner láser móvil** instalado en un vehículo, pasando por los **RPA** (Remotely Piloted Aircraft)¹.



Figura 3-1- Ejemplo RPA. Dji Phantom 3 Standard. Fuente: [56]

¹ RPA (Remotely Piloted Aircraft) es un término para denominar a las aeronaves no tripuladas que son operadas mediante control remoto [1].

Estos equipos emplean técnicas como la **fotogrametría** o la **tecnología LIDAR**. De acuerdo con [57], LiDAR hace referencia a las siglas *Laser Imaging Detection and Ranging*, una técnica de teledetección óptica mediante la cual se puede determinar la distancia desde un emisor a un objeto. Este tipo de sistemas emite haces de rayos láser que viajan por el aire hasta impactar en un objeto cuyo reflejo es detectado por un receptor presente en el sensor. Al medir el tiempo invertido (o la fase de la onda) en este trayecto de ida y vuelta es capaz de determinar la distancia real existente entre ambos puntos. Por otra parte, la fotogrametría consiste en reconstruir el entorno a partir de fotografías. De acuerdo con el Instituto Geográfico Nacional [58], la fotogrametría se define como la técnica cuyo fin es estudiar y definir con precisión la forma, dimensiones y posición en el espacio de un objeto cualquiera, utilizando esencialmente medidas hechas sobre una o varias fotografías de ese objeto. A diferencia de la tecnología LiDAR, que genera directamente la nube de puntos, la fotogrametría requiere un procesado.

Cabe destacar que el escáner láser (tecnología LiDAR), aunque no necesita fotografías para generar la nube de puntos, incluye una cámara para asociar valores RGB a cada punto y así aportar realismo a la nube de puntos. Sin embargo, otros equipos técnicos que también realizan la medición mediante la emisión de rayos láser como la estación total o un medidor láser no ofrecen esta opción pues como se ha mencionado anteriormente, no es necesaria. A pesar de ello el hecho de añadir la información RGB y generar una **nube de puntos colorida** es fundamental pues esto permite distinguir elementos y contornos con mayor facilidad, además de aportar la opción del tratamiento de imágenes modificando los valores RGB.

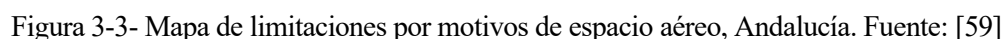
La tecnología más asequible hoy en día es la fotogrametría pues desde un smartphone o un RPA con cámara se puede generar una nube de puntos de gran calidad. El resultado depende principalmente del número de fotografías, solape y calidad de las fotografías.

En las figuras siguientes se muestra un ejemplo práctico donde se muestra la nube de puntos correspondiente al monumento de Blas Infante que se encuentra en la Plaza de Blas Infante de Villarrasa, empleando la cámara del dispositivo iPhone 11 junto con los softwares *ColMap* y *MeshLab* para la generación de la nube de puntos y de la malla 3D respectivamente.



Figura 3-2- Estatua a Blas Infante en Plaza de Blas Infante, Villarrasa (Huelva).

En cuanto a los RPA, el mercado ha crecido considerablemente en los últimos años y esto ha desembocado en que entidades como la Agencia Estatal de Seguridad Aérea (AESA) hayan regulado el uso de estos equipos técnicos y se requieran una serie de licencias y permisos **en función de las características del RPA** (peso, velocidad máxima, altura máxima) y la **zona geográfica donde de trabajo** (ver siguiente figura).

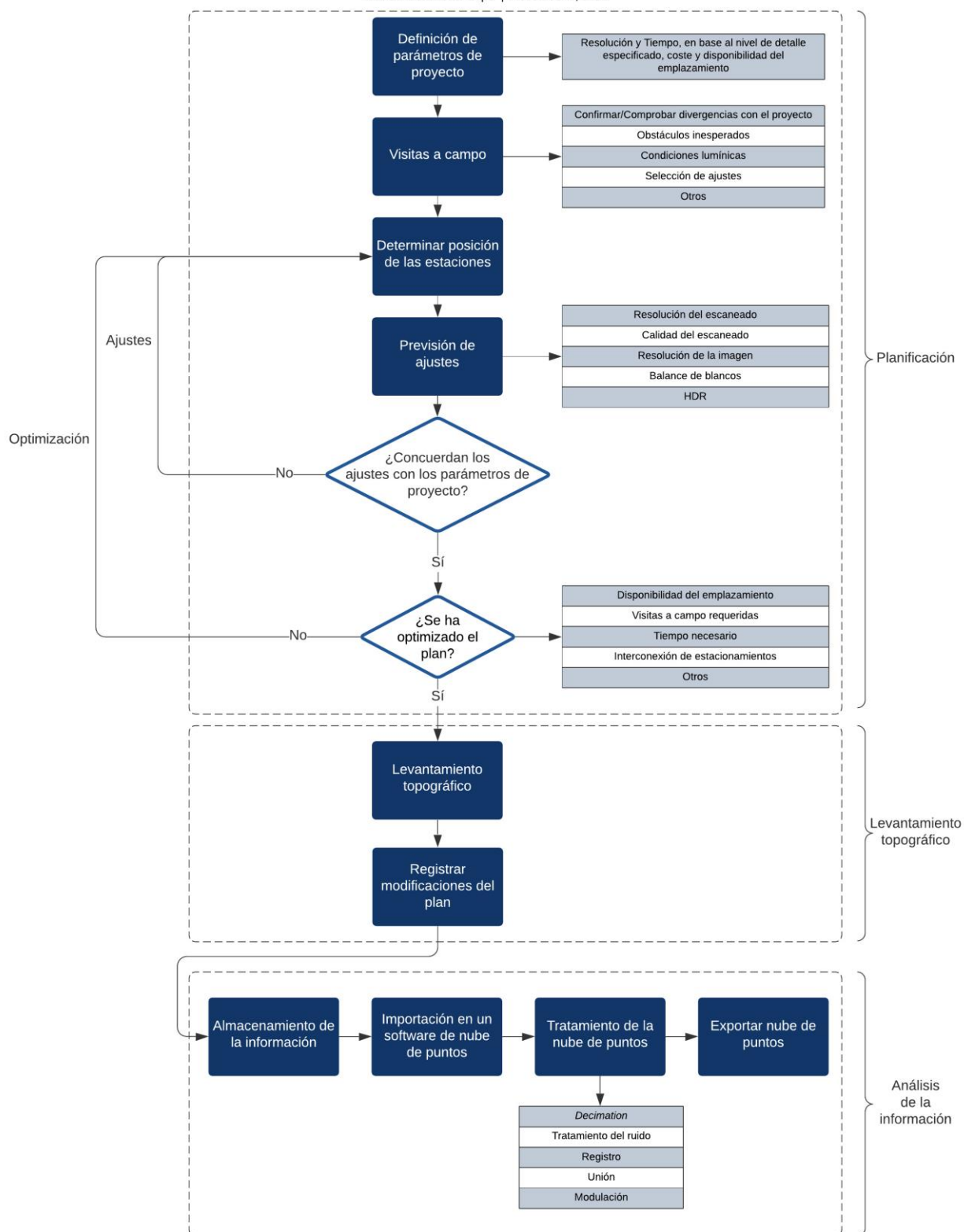


En primer lugar, siempre es necesario inspeccionar la zona donde se quiere trabajar. En esta visita a la zona de estudio, el objetivo es determinar los diferentes problemas que se pueden encontrar a la hora de realizar el levantamiento topográfico, así como cuál es la herramienta más ventajosa para el caso. Por ejemplo, si la zona de estudio es una zona amplia y se encuentra en un área abierta, alejada de entornos urbanos, sería interesante emplear un RPA ya que agilizaría mucho el proceso. Sin embargo, en el caso de que la zona de estudio sea un espacio cerrado, o no se tengan los permisos necesarios para emplear un RPA, interesaría la opción de utilizar un escáner láser. Estos equipos técnicos son fáciles de manejar y permiten recolectar información geométrica y gráfica en un tiempo reducido.

13

Flujo de trabajo con nube de puntos

Manuel Benavente Lepe | November 4, 2021



3.3 Postratamiento de la captura de datos

Al recoger la información geométrica para conseguir la nube de puntos, es muy probable que aparezcan zonas ocultas dentro del campo de visión del instrumento. Por otra parte, en muchos casos las campañas topográficas se realizan en zonas transitadas por usuarios o vehículos, los cuales añaden **ruido a la nube de puntos**². Los huecos que producen las zonas ocultas, así como la presencia de vehículos, peatones, árboles ... dificultan la generación de una superficie a partir de la nube de puntos ya que distorsionan el resultado.



Figura 3-4- Vehículo capturado por la nube de puntos.

Estas superficies pueden llegar a ser muy útiles ya que, por ejemplo, permiten generar un modelo 3D a partir de la nube de puntos. Las superficies se crean a partir de mallas cuyos vértices son los puntos incluidos en la nube de puntos. Por tanto, la presencia de zonas ocultas o de ruido en la nube de puntos desemboca en un peor resultado mientras que, en general, el aumento del número de puntos detectados (mayor resolución) lleva a una mejor definición de la superficie obtenida a partir de la nube de puntos (este aspecto se analizará en el apartado *Escáner Láser*).

Por ello, se han desarrollado softwares para el postratamiento de la nube de puntos los cuales permiten mejorar la calidad del resultado obtenido. Estos softwares ofrecen herramientas de edición que consisten en la adición o eliminación de puntos, entre otras herramientas. Además, se puede mejorar la calidad del resultado añadiendo la información gráfica recogida por la herramienta empleada.

Entre la amplia oferta de softwares, estos se diferencian en función de la tecnología elegida para la obtención de la nube de puntos. En el caso de que el trabajo se haya desarrollado empleando la fotogrametría, es necesario un software para el procesamiento de imágenes y a partir del cual se obtiene la nube de puntos. Entre todos los existentes en el mercado a fecha de octubre de 2021, destacan *ColMap*, *ReCap Photo*, *Agisoft Metashape* y *Pix4D*. Si, por el contrario, el trabajo se ha desarrollado con la tecnología LiDAR (Laser Imaging Detection and Ranging) no es necesario un paso intermedio porque el escáner guarda la información recogida en forma de nube de puntos.

Por otra parte, los **formatos de salida** más utilizados en los que se exporta una nube de puntos son los siguientes:

- **Formato RCS/RCP (.rcs/.rcp).** El software de la compañía *Autodesk* enfocado en el trabajo con las nubes de puntos es *ReCap Pro*. Este software convierte los archivos .e57 en .rcs y, a su vez, varios archivos .rcs se agrupan en un único archivo .rcp, el cual alberga varias nubes de puntos unidas [60].
- **Formato E57 (.e57).** Se trata de un formato compacto y neutral para almacenar nubes de puntos, imágenes y metadatos producidos por sistemas de imágenes en 3D. El formato de archivo está

² Se entiende por ruido los puntos que distorsionan la información geométrica de interés que se pretende capturar con la nube de puntos. Por ejemplo, la presencia de un vehículo cuando se quiere capturar la plataforma de la carretera.

especificado por la *ASTM (American Society for Testing and Materials)*, una organización de estándares internacionales, documentado en la norma ASTM E2807. Los archivos de esta extensión son aptos para el renderizado de objetos reales, como edificios y superficies geológicas, resultando de gran utilidad en el sector de la construcción, ingeniería, investigación y topografía. El formato E57 es el nativo del escáner láser 3D Faro [60].

- **Formato LAS (.las).** Permite la compresión de archivos *LAS* voluminosos en archivos *LAZ* compactos que son solo del 10 al 20 por ciento del tamaño original, preservando con precisión cada bit y sin pérdidas. Algunos softwares como *Global Mapper* pueden importar y exportar archivos en formato *LAZ*. Otros softwares, como *ReCap Pro*, solo permiten importar este formato [60].
- **Formato CSV (.csv).** Un *CSV* (valores separados por comas) representa datos en forma de tabla. Para ello, almacena la información alfanumérica, para que se puedan crear capas [60].

Dado que softwares como *ReCap Pro*, *Faro Scene* o *Leica Cyclone*, que trabajan con nubes de puntos, ofrecen la opción de generar **objetos 3D**, se analizan a continuación algunos de los formatos de exportación de objetos más utilizados según [61].

- **Formato OBJ (.obj).** Genera un archivo simple y común que ilustra claramente toda la información geométrica 3D. Normalmente se usa para aplicaciones 3D, impresión 3D o programas de modelado entre otros.
- **Formato FBX (.fbx).** Genera un archivo de modelo 3D con capacidades de intercambio ampliamente usadas.

Dado que en el presente TFM se va a trabajar con datos obtenidos de un escáner láser (ver apartado *Levantamiento topográfico para el caso de estudio*), se analizan los softwares que permiten tratar las nubes de puntos más empleados, como son *Faro Scene*, *Leica Cyclone* y *ReCap Pro*.

3.3.1 Faro Scene

El software *Faro Scene* está diseñado específicamente para todas las soluciones de digitalización FARO y escáneres láser de terceros [62]. Este software permite procesar y administrar datos digitalizados usando reconocimiento automático de objetos, así como registro y validación de escaneo. Además, *Faro Scene* ofrece una interfaz donde se puede analizar la nube de puntos capturada.

Este software posee características muy interesantes, de las cuales se destacan las siguientes dentro del apartado de procesamiento de datos de escaneo [62]:

- Búsqueda automática de referencias artificiales o naturales.
- Soporta la creación de mallas totalmente texturizadas que pueden incorporarse a otras aplicaciones como modelos 3D a color.
- Exportación rápida y versátil de datos de escaneo al formato de nube de puntos RCP/RCS de *Autodesk*.

Por otra parte, dada la importancia de los equipos en el tratamiento de toda esta información, se señalan los requisitos técnicos recomendados según [62].

- **Hardware.** Se recomienda un hardware Intel Core i7/i9/Xeon, 8 núcleos físicos, 64 GB de RAM, OpenGL 4.3, Unidad de estado sólido de 1 TB + unidad de disco duro convencional, resolución de la pantalla: 1920 x 1080 px.
- **Tarjeta de gráficos.** Se recomienda Tarjeta gráfica dedicada, OpenGL 4.3, DirectX 11 con nivel de funcionalidades 11.0 o superior, al menos 8 GB de memoria;
 - para representación estéreo y visualización: NVIDIA Quadro;
 - para representación de RV y visualización: NVIDIA 1080GTX o similar;
 - visores de realidad virtual 3D compatibles: Oculus Rift S o HTC Vive con controles táctiles, StreamVR.
- **Sistema Operativo.** Windows 10, 64-bits.

3.3.2 Leica Cyclone

El software de Leica, *Leica Geosystems HDS Cyclone* se compone de una familia de módulos que proporciona numerosas opciones de procesos de trabajo para proyectos de escaneo láser 3D en aplicaciones de ingeniería, construcción, topográficas y similares [63].

Dado que la compañía desarrolladora de este software es Leica, **admite la importación de los ficheros** que generan los diferentes escáneres de esta empresa como, por ejemplo, el escáner *Leica BLK 360*.



Figura 3-5- Escáner Leica BLK360. Fuente: [64]

En este caso, como se ha mencionado anteriormente, este software se divide en **seis módulos**, cuyas aplicaciones se pueden ver en [65]. Los módulos son los siguientes:

1. Fieldworx
2. Basic
3. Register 360 (BLK Edition)
4. Register 360
5. Register
6. Model
7. Survey
8. Free Viewer

Cabe destacar tras este análisis que el módulo Fieldworx está enfocado para su uso con dispositivos tipo tablet.

Por otra parte, las especificaciones recomendadas para los equipos de escritorio son las siguientes:

- Procesador. El último procesador i7 quad-core o equivalente a 3.5 GHz o superior.
- RAM. 64 GB
- Sistema Operativo. Windows 7 (64-bits) o Windows 10 (64-bits).
- Gráficos. Tarjeta gráfica dedicada de 8 GB, Nvidia Quadro, Nvidia GeForce o AMD Radeon.
- Disco duro. Dos Disco duros SSD, uno para escritura y otro para lectura.

3.3.3 ReCap Pro

Se analizando este software perteneciente a Autodesk puesto que, para la realización de este TFM, esta alternativa es la única posible ya que la Universidad de Sevilla ofrece licencias gratuitas del paquete de softwares de Autodesk para sus estudiantes.

ReCap Pro es un software que permite **importar fotografías** (existe una versión denominada *ReCap Photo*) y **exploraciones láser** para proporcionar una nube de puntos o malla texturizada que sirvan de apoyo a los procesos BIM [66].

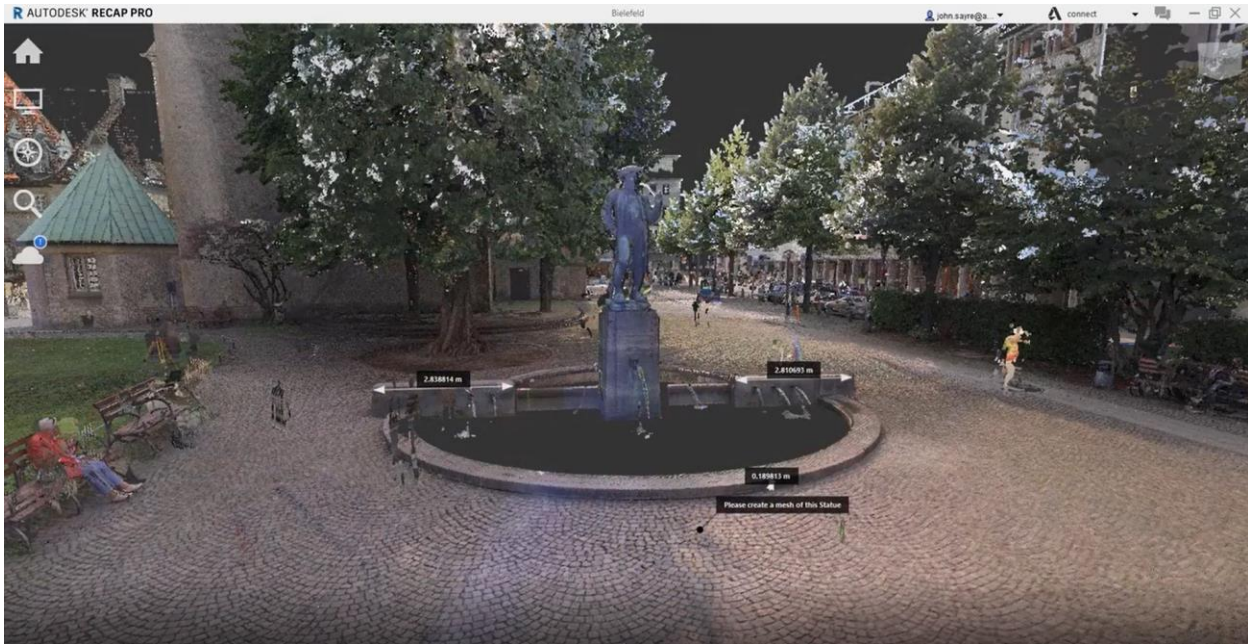


Figura 3-6- Ejemplo Nube de Puntos en *ReCap Pro*. Fuente: [67]

Este software permite importar datos de escaneo independientemente del software, trabajando con los **formatos XYZ, .las y .e57**, ampliamente desarrollados. También permite trabajar con los formatos .FLS, .FWS y .LSPROJ de Faro, o los formatos .PRJ y .PTG de Leica [68].

Por otra parte, **la nube de puntos editada se puede exportar** en los formatos .e57, .PTS y .RCS/RCP. Además, en caso de que el objetivo sea exportar la malla 3D generada, este software permite exportarla en los formatos .OBJ y .FBX [61]. Sin embargo, esta opción no está disponible en versiones de estudiante y versiones de prueba [69].

Por último, las especificaciones del sistema recomendadas según [70] son las siguientes:

- Sistema operativo. Windows 10 (64 bits).
- Tipo de CPU. Procesador de 2,0 gigahercios (GHz) o más rápido de 64 bits (x64).
- Memoria. RAM de 8 GB o más.
- Resolución de pantalla. 1600 x 1050 px o superior con color verdadero.
- Tarjeta gráfica. Tarjeta gráfica de estación de trabajo compatible con OpenGL 3.3 con memoria gráfica de 1 GB o más.

3.3.4 Análisis Comparativo de las herramientas informáticas

La oferta de software disponible aumenta cada día debido a la gran utilidad de esta tecnología y la gran capacidad de mejora y eficiencia que se puede obtener con el desarrollo de un programa adecuado. Actualmente, los fabricantes Leica y Faro ofrecen grandes herramientas para el trabajo con las nubes de puntos obtenidas a través de sus equipos. Una característica importante para señalar es que **la información que recogen los equipos de escáner láser de estos fabricantes no se puede extraer a no ser que se emplee su software correspondiente (Leica Cyclone o Faro Scene)**, el cual requiere de una licencia para su uso.

Una vez mencionado este aspecto, se realiza una comparación de los tres softwares atendiendo a los **archivos de importación**, los **archivos de salida** que genera, la **eficiencia** y **grado de automatización** y las **especificaciones técnicas recomendadas**.

3.3.4.1 Archivos de importación

En cuanto a los formatos de importación admitidos por estos softwares, existe una gran diferencia entre ellos. En primer lugar, *ReCap Pro* se posiciona como un software intermedio o que pueden emplear usuarios que

reciben una nube de puntos tras ser tratada por el software del fabricante correspondiente. Por tanto, se aleja en este sentido de *Leica Cyclone* y *Faro Scene*, los cuales además de permitir la importación de numerosos formatos de nubes de puntos como *ReCap Pro* [71] [62] [68], también permiten leer la información recogida por escáneres láser de Leica y Faro respectivamente.

3.3.4.2 Archivos de Salida

En cuanto a los archivos de salida que genera, los tres permiten exportar a formato .RCP/.RCS, así como formatos estándar de nubes de puntos como el .e57 o .pts.

3.3.4.3 Eficiencia

En cuanto a eficiencia, los softwares *Leica Cyclone* y *Faro Scene* destacan considerablemente sobre *ReCap Pro*. Los softwares de Leica y Faro detectan formas a partir de la nube de puntos y son capaces de crear elementos a partir de ellas. Esto ahorra una gran parte de las horas de posprocesamiento dedicadas a las nubes de puntos, y es una de las líneas de investigación más demandadas actualmente en este ámbito.

3.3.4.4 Automatización

En cuanto a la automatización, conviene señalar que en este caso se entiende la automatización como la detección de formas automáticamente y generación de objetos a partir de ellas, o la realización de tareas como eliminación del ruido.

De acuerdo con [65], el software *Leica Cyclone* ofrece la opción de generar elementos tridimensionales ajustados a la nube de puntos de forma automática. Si bien, existe un cierto porcentaje de trabajo manual que implica la selección del elemento identificado en la nube de puntos y la elección del tipo de objeto al que se desea convertir.

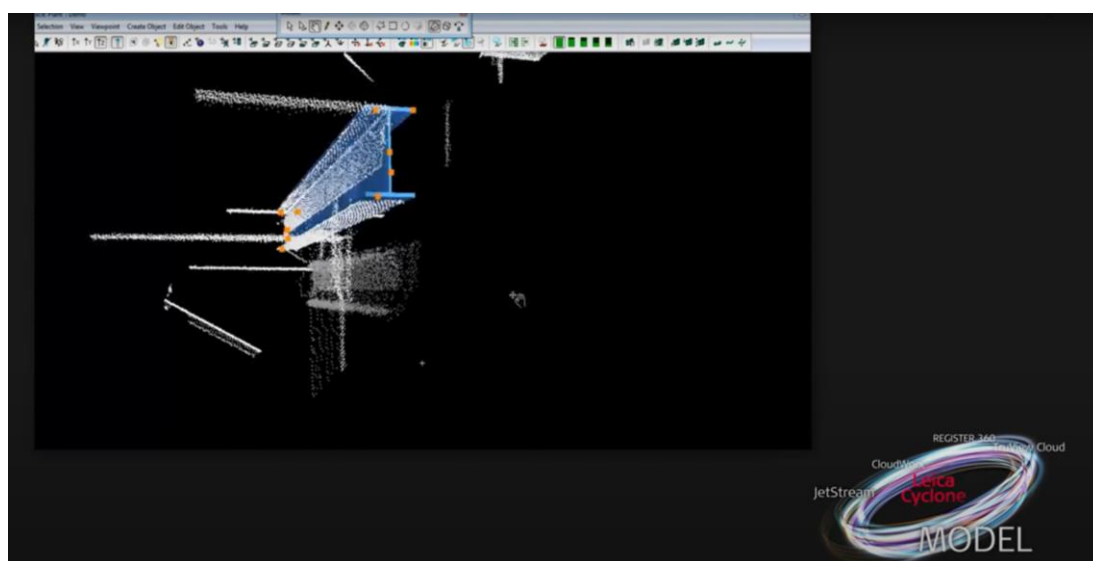


Figura 3-7- Generación de elementos de forma automática con *Leica Cyclone*. Fuente: [65]

Por otra parte, en cuanto al software *Faro Scene*, durante el procesamiento de datos de escaneo permite buscar automáticamente referencias naturales como esferas, o naturales como planos. Además, retira de forma automática de los datos de escaneo registrados los objetos no deseados que se movían en la escena mientras se estaba escaneado, tales como personas o vehículos [62].

Por último, en cuanto a *ReCap Pro*, este software no ofrece herramientas de automatización.

3.3.4.5 Requisitos técnicos recomendados

Por último, se muestra a continuación una tabla comparativa donde se recogen los requisitos técnicos recomendados por parte de las empresas desarrolladoras de cada software.

Tabla 3-1- Requisitos técnicos recomendados

	<i>ReCap Pro</i>	<i>Leica Cyclone</i>	<i>Faro Scene</i>
Sistema operativo	Windows 10 (64 bits)	Windows 7 (64 bits) Windows 10 (64 bits)	Windows 10 (64 bits)
Tipo de CPU	Procesador de 2,0 gigahercios (GHz) o más rápido de 64 bits (x64).	El último procesador i7 quad core o equivalente a 3.5 GHz o superior.	Intel Core i7/i9/Xeon, 8 núcleos físicos
Memoria RAM	8 GB	64 GB	64 GB
Resolución de pantalla	1600 x 1050 px o superior con color verdadero	-	1920 x 1080 px
Tarjeta gráfica	Tarjeta gráfica de estación de trabajo compatible con OpenGL 3.3 con memoria gráfica de 1 GB o más.	Tarjeta gráfica dedicada de 8 GB, Nvidia Quadro, Nvidia GeForce o AMD Radeon.	Tarjeta gráfica dedicada, OpenGL 4.3, DirectX 11 con nivel de funcionalidades 11.0 o superior, al menos 8 GB de memoria
Memoria	-	Dos Disco duros SSD, uno para escritura y otro para lectura	Unidad de estado sólido de 1 TB + unidad de disco duro convencional

Como se puede observar, los requerimientos recomendados para los softwares *Leica Cyclone* y *Faro Scene* son muy superiores a los que recomienda *ReCap Pro*.

4 LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO CON ESCÁNER LÁSER

A día de hoy, existen numerosos métodos para la adquisición de información geométrica, lo cuales requieren diferentes instrumentos o una combinación de ellos. Por ejemplo, se puede realizar un levantamiento topográfico mediante una estación total, láser escáner, RPAS, medidor láser sin necesidad de emplear otros equipos. En función del objetivo que se pretenda alcanzar es interesante el empleo de uno de los instrumentos o de un conjunto de estos.

En el presente TFM el estudio se centrará en analizar la **tecnología del láser escáner**. Atendiendo al resultado que ofrece este elemento, es muy útil dentro del sector AEC pues con un tiempo muy reducido es capaz de abarcar grandes superficies y reproducir la realidad con un nivel de detalle elevado.

Para el análisis de esta herramienta, se comienza con el estudio de la tecnología que emplea para la generación de nubes de puntos, conocida como LiDAR. Más tarde, se analizan los diferentes tipos de escáner láser, las características de estos equipos y, por último, se expone la información empleada en el caso de estudio.

El análisis de estos equipos estará enfocado hacia la tecnología que emplean para la generación de nubes de puntos y la información que ofrecen para su posterior tratamiento.

El **láser escáner** es un instrumento empleado para capturar la geometría y el color de cualquier objeto, o del entorno cercano, a partir del almacenamiento masivo de datos [72]. Los datos son obtenidos en forma de nube de puntos mediante la medición de distancias y ángulos a través de un rayo de luz láser combinado con cámaras fotográficas para así registrar también la información del rango visible. De esta forma, la tecnología del escáner láser permite obtener la información geométrica de un objeto o entorno real para después modificarlo y trabajar con él.

Entre las aplicaciones de esta tecnología en el sector AEC destaca la monitorización del progreso de la construcción, generación de modelos *As-built*, certificación de obra o el control de calidad.

Con esta breve descripción se observa el gran potencial de estos equipos, más aún en el sector AEC, permitiendo obtener datos georreferenciados en cuestión de minutos.

4.1 La tecnología LiDAR

LiDAR (*Laser Imaging Detection and Ranging*) es una técnica de teledetección óptica que utiliza la luz de láser para obtener una muestra densa de la superficie de la tierra produciendo mediciones exactas de x, y, z. LiDAR, que se utiliza principalmente en aplicaciones de representación cartográfica láser aéreas, está surgiendo como una alternativa rentable para las técnicas de topografía tradicionales como la fotogrametría [73].

Los componentes de hardware principales de un sistema LiDAR incluyen un vehículo de recolección (avión,

helicóptero, vehículo y trípode), sistema de escáner láser, GPS (Sistema de posicionamiento global) e INS (sistema de navegación por inercia). Un sistema INS mide la rotación, inclinación y encabezamiento del sistema LiDAR en movimiento a partir de los datos de medición de la unidad de medida inercial (IMU), donde la IMU es un dispositivo que mide aceleraciones y velocidades angulares [74].

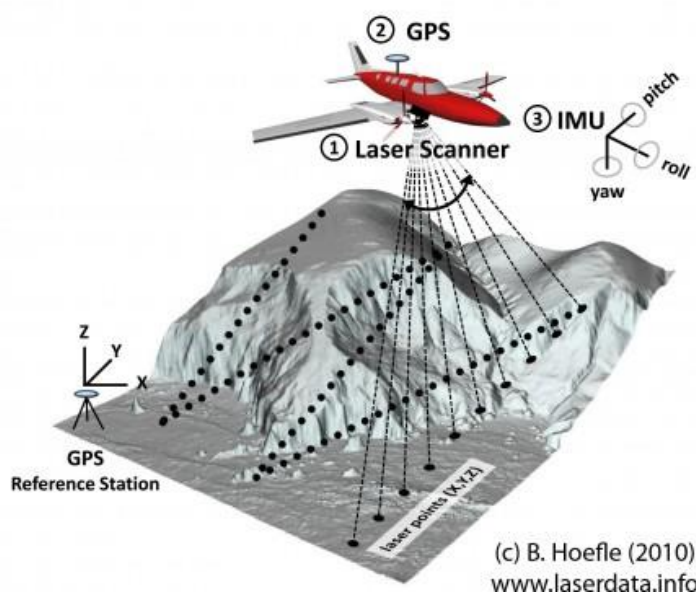


Figura 4-1- Tecnología LiDAR. Fuente: [75]

Por otra parte, junto con el valor posicional x , y , z de cada punto se almacena información adicional. De acuerdo con [73], existen los siguientes atributos LiDAR: intensidad, número de devolución, cantidad de devoluciones, valores de clasificación de punto, puntos que están en el borde de la línea de vuelo, valores RGB, tiempo del GPS, ángulo de escaneo y dirección de escaneo. Es importante señalar que los atributos LiDAR enumerados no siempre se proporcionan en el archivo LiDAR de salida final.

En cuanto al almacenamiento de datos LiDAR, originariamente sólo se enviaban en formato ASCII. Con el enorme tamaño de los conjuntos de datos LiDAR, un formato binario llamado LAS fue muy pronto adoptado para administrar y estandarizar la forma en que los datos LiDAR se organizaban y difundían. Actualmente es muy común ver datos LiDAR representados en LAS, como se verá más adelante que ocurre en la información disponible para el caso de estudio. LAS es un formato de archivo más aceptable porque contiene más información y, al ser binarios, pueden ser leídos por el importador de forma más eficaz [76].

LAS es un formato industrial creado y mantenido por la American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS). Es un formato de archivo estándar publicado para el intercambio de datos LiDAR que mantiene información específica relacionada con ellos. Es una manera de que los proveedores y los clientes intercambien datos y de conservar toda la información específica de esos datos [76].

Cada archivo LAS contiene metadatos del estudio LiDAR en un bloque de encabezado seguido de registros individuales de cada pulso láser registrado. El encabezado de cada archivo LAS contiene información de atributos sobre el propio estudio del LiDAR: alcance de los datos, fecha del vuelo, hora del vuelo, número de registros de puntos, número de puntos por retorno, cualquier desplazamiento aplicado a los datos y cualquier factor de escala aplicado. Además de los atributos de puntos LiDAR señalados anteriormente, también se mantienen los siguientes atributos para cada pulso láser de un archivo LAS: datos de usuario, Id. de origen de puntos e información de forma de onda [76].

4.2 Tipos de escáner láser

De acuerdo con [72], los diferentes tipos de escáner láser se pueden clasificar en función de la medición de la distancia o de la técnica de recolección de datos.

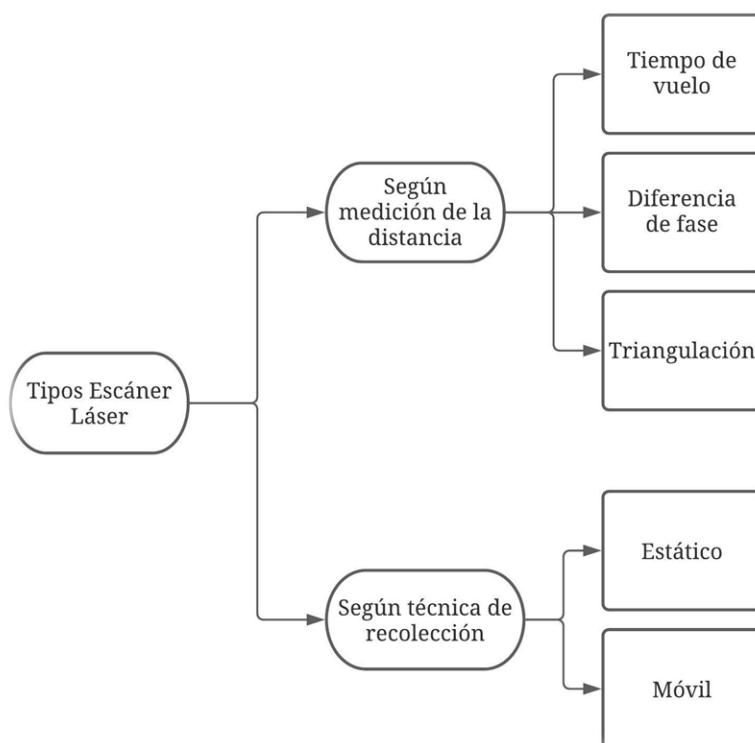


Figura 4-2- Clasificación del escáner láser

Analizando con mayor detalle esta clasificación se tiene lo siguiente.

- En función de **la medición de la distancia**:
 - **Tiempo de vuelo.** Los escáneres que emplean esta técnica poseen un transmisor del rayo láser junto con un receptor. De esta forma, la técnica consiste en medir el tiempo que tarda el rayo láser desde que es emitido por el escáner hasta que es detectado por el receptor, habiéndose reflejado anteriormente en el objeto que se quiere medir.

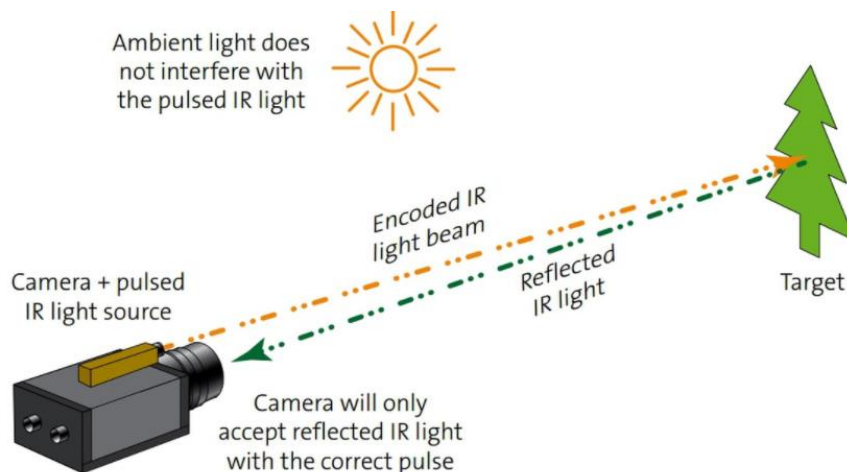


Figura 4-3- Esquema de la tecnología de tiempo de vuelo. Fuente: [77]

- **Diferencia de fase.** En este caso, los escáneres que emplean esta técnica emiten una serie de ondas láser de diferente longitud de onda sobre el objeto medido, las cuáles al ser reflejadas y recibidas de nuevo en el escáner permiten determinar la distancia al objeto, comparando la fase de las ondas emitidas con las recibidas. Uno de los puntos fuertes de

esta técnica es la mayor precisión en la medición, así como la cantidad de puntos registrados (llega a un millón de puntos por segundo).

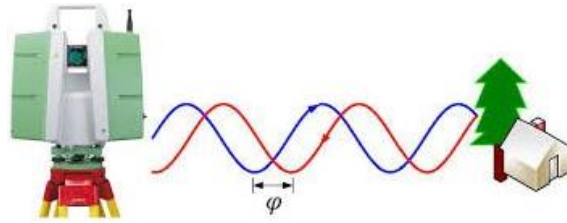


Figura 4-4- Esquema de la técnica de diferencia de fase. Fuente: [72]

- **Triangulación.** Como su propio nombre indica, se calcula la distancia al objeto escaneado mediante cálculos trigonométricos. Para ello, el escáner necesita un emisor láser y una cámara para localizar la proyección del haz láser proyectado, manteniéndose un ángulo constante entre ellos. Mediante un software de triangulación, se resuelve el problema trigonométrico. Posicionando la cámara en un ángulo específico respecto al láser y gracias a la variación de la orientación del láser, el software podrá reconstruir a nube de puntos deseada. La distancia entre el objeto y el láser debe ser reducida para obtener resultados adecuados.

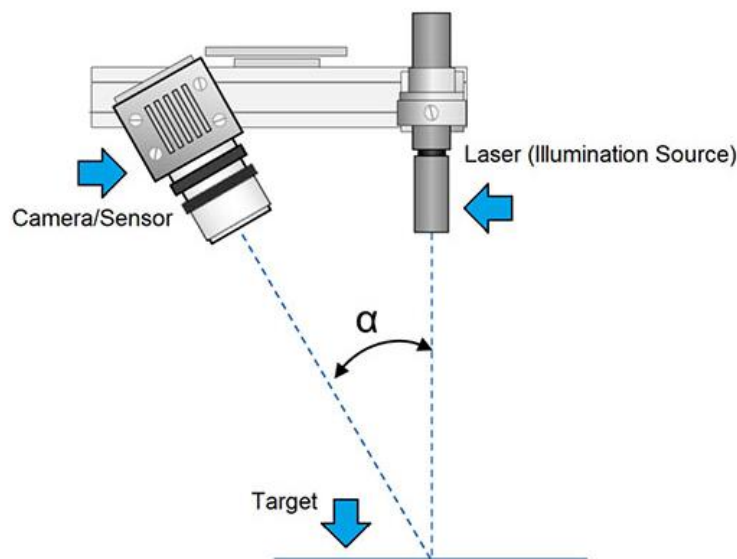


Figura 4-5- Esquema de la tecnología de triangulación láser. Fuente: [78]

- En función de la **técnica de recolección**:

- **Escáner láser estático:** el escaneado se realiza manteniendo el escáner estacionado sobre un punto concreto. Cada estacionamiento, genera una nube de puntos. En el caso de que se necesiten varios estacionamientos, las diferentes nubes de puntos generadas se unen por puntos en común para así generar una nube de puntos global. De esta forma, es importante tener en cuenta que los estacionamientos deben generar nubes que puedan conectarse entre sí. Una gran ventaja es la accesibilidad (emplean el soporte trípode convencional) y su precisión posicional.



Figura 4-6- Escáner láser 3D Leica RTC360. Fuente: [79]

- **Escáner láser móvil:** se corresponde con un escáner láser bidireccional que realiza mediciones durante su desplazamiento. Para garantizar el posicionamiento del punto que se quiere medir, es necesario usar sensores externos, como un Sistema GNSS y una IMU (Sistema inercial). Su funcionamiento es similar al de los equipos aerotransportados, consiguiendo una gran precisión degradada en función de varios sensores, ángulos y distancias medidas. Debido a los sensores externos, su tamaño es mayor que el estático y puede ser instalado en cualquier vehículo móvil, o incluso ser transportado por el mismo usuario.



Figura 4-7- Escáner láser Leica Pegasus: Two. Fuente: [80]

4.3 Características

Como bien se ha mencionado anteriormente, los escáneres láser incluyen una o varias cámaras que permiten añadir un rango de color a puntos registrados. De esta forma, al igual que cualquier cámara del mercado, el escáner láser posee unos parámetros modificables en función del resultado buscado.

De acuerdo con [18], los parámetros que se establecen en cada estacionamiento son los siguientes:

- **Resolución.** Establece la distancia (en milímetros) entre los puntos capturados, tanto vertical como horizontalmente, para un radio de 10 m medido desde la posición de estacionamiento del escáner láser. A mayor distancia entre puntos, menor precisión y densidad de la nube de puntos captura.

- **Calidad.** Se relaciona con la precisión con la que un punto concreto es capturado. Un aumento de la calidad se traduce en un tiempo mayor de rotación del escáner, para cada punto a adquirir con una mayor precisión cuando se requiera (por ejemplo: objetos lejanos, presencia de vidrio, etc.)
- **Balance de blancos.** Permite la adquisición de tonos blancos y la corrección general de los colores de la fotografía. Este parámetro debe ajustarse en función de las condiciones de luz existentes en el ambiente.
- **Resolución de imagen.** Define el número de píxeles, tanto vertical como horizontalmente, para las fotografías adquiridas. Una resolución mayor se traduce en una imagen más nítida, con mayor calidad y menor desenfoque, pero implica un mayor tamaño del archivo y mayor tiempo de escaneado.
- **High Dynamic Range (HDR).** Se emplea para extender el rango dinámico (ratio entre el valor más claro y oscuro de una imagen). El escáner intenta obtener imágenes con diferentes exposiciones, haciendo un balance entre ellas.

A la hora de realizar una medición con esta herramienta es muy importante controlar los parámetros descritos anteriormente. De la misma forma, se debe conocer previamente el objetivo que se pretende conseguir para así poder optimizar la solución y no adquirir un exceso de información o un nivel de información insuficiente.

Para adquirir una idea sobre los valores de los parámetros anteriores necesarios en función del caso, existen guías y casos de estudio que pueden servir como punto de partida. Por ejemplo, en el caso de que se pretenda generar un modelo BIM a partir de la nube de puntos, el GSA (General Service Administration) ha desarrollado una tabla en la que se determina el LOD (Level of Detail) obtenido en **función de la resolución y la tolerancia** en su serie 3 de *GSA BIM Guide Series*, [17].

Tabla 4-1- LOD según GSA, tolerancia y resolución. Fuente: [17]

LOD	Tolerancia (mm)	Resolución (mm x mm)
Nivel 1	± 51	152 x 152
Nivel 2	± 13	25 x 25
Nivel 3	± 6	13 x 13
Nivel 4	± 3	13 x 13

Donde la tolerancia se define como la desviación dimensional permitida en el entregable con respecto a la realidad (siendo la realidad medida a través de algún otro medio) en el marco de coordenadas especificado. Algunos ejemplos de tolerancias son: 1) Nube de puntos: la distancia entre dos puntos en una nube de puntos comparada con la distancia real entre los mismos dos puntos en la escena actual debe ser inferior a la tolerancia especificada. 2) Plano: la diferencia entre la longitud de un muro en un plano 2D y la longitud real del muro debe ser inferior a la tolerancia especificada.

Por otra parte, la resolución se define como las dimensiones del elemento más pequeño reconocible.

De esta forma, la modificación de los diferentes parámetros presentes en el escáner láser tendrá una gran influencia en cuanto al tamaño del archivo resultante y el tiempo medio invertido en el escaneado. En [18] se ha realizado un estudio relacionado con este asunto. El estudio trata de realizar un análisis de sensibilidad, modificando los diferentes parámetros del escáner láser sobre una misma escena. El objetivo es mostrar qué parámetros influyen en mayor medida en cuanto al tamaño total del archivo generado (nube de puntos + imágenes) y el tiempo medio de escaneado. Atendiendo a las condiciones en las que se realizó el estudio (se realizaron 32 test), se obtienen las siguientes conclusiones principales:

- El impacto de los parámetros resolución y resolución de imagen es aproximadamente proporcional al número de puntos en la nube y al número de píxeles en la imagen, respectivamente.
- El tiempo de escaneado depende principalmente de la resolución y calidad establecidas, mientras que el número de fotografías es constante para cada escaneado independientemente de la resolución de imagen seleccionada.
- El uso de diferentes valores para los parámetros de resolución de imagen y calidad no genera importantes ganancias de información geométrica.

También se concluye del estudio el hecho de que las imágenes tomadas por el escáner láser solo son empleadas como fuente para determinar los valores RGB de cada punto incluido en la nube, y que una modificación en la resolución de la imagen no afecta significativamente al valor RGB asignado a cada punto. Por tanto, se determina que el valor del parámetro resolución de la imagen se mantenga al mínimo. Sin embargo, en el caso de aplicar el escaneado láser para propósitos específicos como la segmentación automática sí es interesante modificar este parámetro, pero para la mayoría de los casos BIM no resulta significativa.

Por otra parte, en cuanto al parámetro calidad se concluye que los cambios producidos en la información geométrica por un aumento de este no son significantes de acuerdo con las condiciones en las que se ha realizado el estudio. Por ello, se recomienda aumentar el parámetro calidad cuando las condiciones ambientales sean desfavorables (superficies de vidrio o rugosas, objetivos lejanos, ambientes húmedos).

En cuanto al parámetro resolución, este sí tiene una importante influencia. El incremento de la resolución se traduce en una ganancia importante de información (atendiendo a su definición, se permite reconocer elementos más pequeños). Sin embargo, llega un punto en el que un aumento de la resolución no se traduce en una ganancia de información y, por tanto, mientras una mayor resolución puede llevar a un resultado más detallado, también puede que no se gane información geométrica relevante. De esta forma, la resolución se alza como el parámetro más importante a controlar a la hora de realizar un levantamiento mediante escáner láser. Es importante escoger cuidadosamente la resolución pues con el aumento de esta se produce un crecimiento exponencial en el tamaño del archivo generado y el tiempo de escaneado. Este hecho concuerda con la tabla de la GSA señalada anteriormente, en la cual se determina el LOD atendiendo únicamente al parámetro resolución.

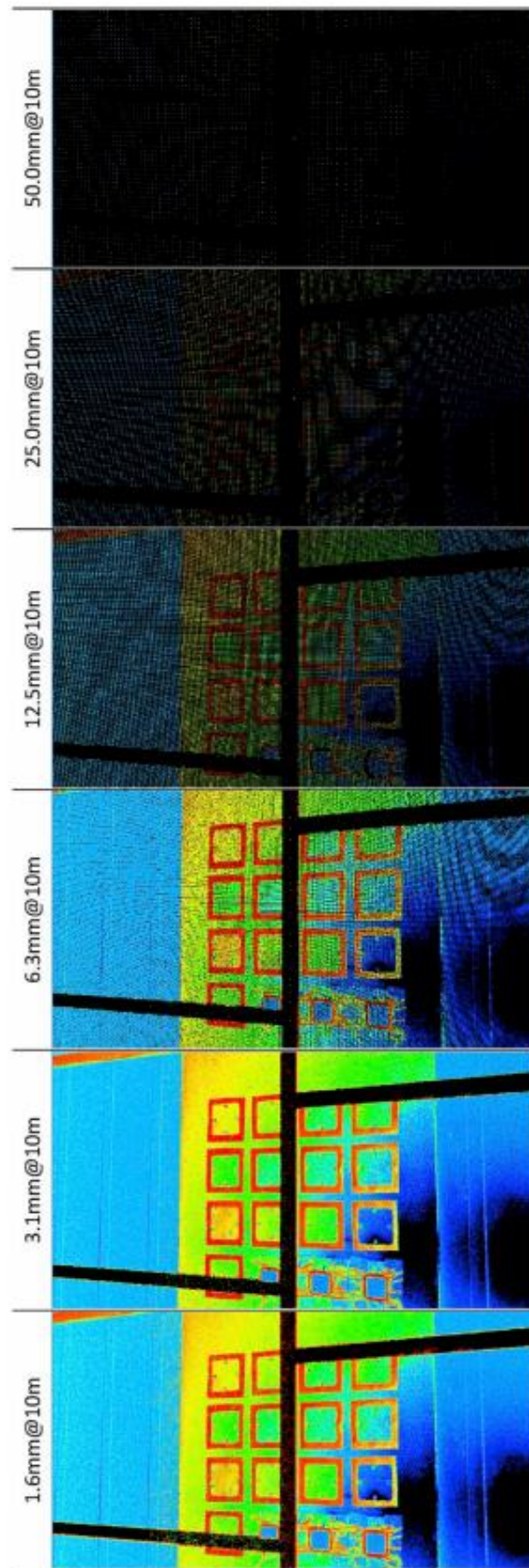


Figura 4-8- Impacto de la resolución en la información geométrica adquirida. Fuente: [18]

4.4 Levantamiento topográfico para el caso de estudio

Para el desarrollo de la aplicación que se presenta en este TFM, se ha empleado la documentación ofrecida por la **Dirección General de Infraestructuras** de la *Consejería de Fomento, Infraestructuras y Ordenación del Territorio* de la **Junta de Andalucía**. En concreto, se trata del **tramo de la A-474 correspondiente al Pk 49+700 a 50+800** de la Red de Carreteras de Andalucía, en el término municipal de Almonte (Huelva). En el Anexo *Situación* se recoge con más detalle la localización del tramo de estudio.

Los datos aportados con los cuales se desarrolla el trabajo quedan recogidos en la siguiente tabla.

Tabla 4-2- Inventario de archivos aportados

Número	Denominación	Formato	Descripción	Tamaño
1	A-474 (18)	LAS	Nube de puntos correspondiente al tramo de estudio	664.063 KB
2	A-474 (19)	LAS	Nube de puntos correspondiente al tramo de estudio	664.603 KB
3	A-474	dwg	Modelo 2D. Marcas viales de A-474	330 KB
4	Panoramas	jpg	Imágenes panorámicas del tramo de estudio	-
5	A-474_ROTULADO	dxg	Modelo 2D. Eje A-474	6.805 KB

Toda esta información será muy útil de cara al caso práctico llevado a cabo en el presente TFM. Como se puede observar, la nube de puntos aparece en formato .LAS. Este formato, el cual se analizó en el apartado *La tecnología LiDAR*, permite que proveedores y clientes intercambien datos mientras la información específica de los datos LiDAR se conserva. A continuación, se muestra en la siguiente figura la nube de puntos vista con el software *ReCap Pro*.

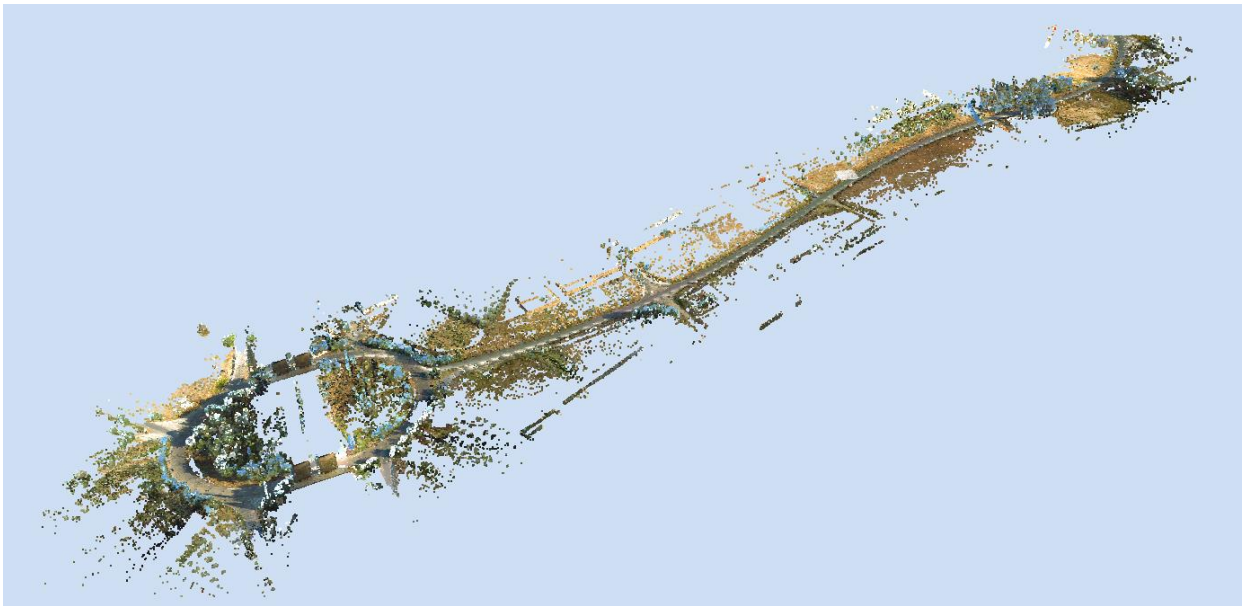


Figura 4-9- Nube de puntos de la A-474 desde Pk 49+700 hasta 50+800

Esta nube de puntos fue capturada mediante un escáner láser móvil cuyas especificaciones técnicas se indican en el Anexo *Escáner Láser*.

Por otra parte, el modelo 2D de las marcas viales de la A-474 será muy importante de cara a distinguir con detalle los límites de las diferentes partes que componen la carretera. Si bien en la nube de puntos se pueden distinguir las marcas viales con un nivel de detalle aceptable, su representación manual conduciría a un error de precisión. Por ello, será de gran utilidad este fichero.

Además, se disponen de imágenes panorámicas que aportan calidad visual a la nube de puntos al asignar a cada punto unos valores RGB. A continuación, se muestra un ejemplo de imagen panorámica.



Figura 4-10- Imagen panorámica en el tramo de estudio

Por último, se tiene el eje de la plataforma donde se incluyen las etiquetas de los puntos kilométricos cada 20 metros. En este fichero se ha representado también el radio de cada alineación curva en planta y será de especial importancia a la hora de definir la trayectoria a seguir por los vehículos en el tramo de estudio.

5 LA DIGITALIZACIÓN DE LA REALIDAD

En 1957 nació la idea de añadir datos sintéticos al mundo real con Morton Helling y su *sensorama*. Este aparato podía transmitir imágenes 3D al usuario mientras se sumaba a la experiencia un sonido envolvente y la capacidad de hacer vibrar los asientos donde se situaba el espectador, así como crear vientos lanzados directamente hacia él. Muchas personas consideran a este equipo un antecesor de la realidad virtual, aunque también poseía elementos que luego tomarían algunos softwares de realidad aumentada. La RV y AR poseen un origen y una historia compartida que debido a los avances de la tecnología se ha ido separando [81].

La realidad virtual (RV) proporciona nuevos significados para BIM, así como el trabajo colaborativo que conlleva esta metodología. La aplicación e innovación resultante de unir BIM+VR ayudará a conseguir una mayor eficiencia en la comunicación y calidad de diseño en todo el ciclo de vida de un proyecto [36].

Una de las principales aplicaciones buscadas con esta unión es alcanzar una evaluación orientada hacia las personas y una optimización de los diferentes diseños surgidos durante el desarrollo de un proyecto. Al poder acceder a una visión realista del resultado final, se permite tomar decisiones con mayor precisión y conocimiento. Al combinar la realidad virtual con un modelo BIM, aparece la posibilidad de acceder a nuevas herramientas como la imagen holográfica.

La realidad virtual conecta el modelo BIM con la percepción del ser humano, lo cual ofrece nuevas evaluaciones del diseño tales como el análisis racional, evaluación del paisaje, visión panorámica del antes y después de la construcción. Por ejemplo, su aplicación en un proyecto de diseño de autovía ayudaría a evaluar con mayor precisión la señalización horizontal y vertical, la seguridad vial o el análisis del deslumbramiento en el carril [36].

Junto con la realidad virtual, se han desarrollado otras tecnologías que permiten obtener información del modelo BIM desde un punto de vista de primera persona. Estas son, además de la Realidad Virtual, la Realidad Aumentada y la Realidad Mixta. A continuación, se analizará cada una de ellas de forma independiente.

Al trabajar con esta tecnología surge un nuevo concepto denominado “inmersión”. Este concepto es muy utilizado y proviene de la industria del cine. Significa introducirse por completo en otro mundo, en contraste con la metáfora de una ventana a través de la cual se observa lo que pasa desde fuera. Dentro de la realidad virtual, la inmersión se produce cuando el usuario se olvida de que está en un mundo artificial [82]. Para ello, se sumerge al usuario dentro de la escena mediante instrumentos como gafas, sonido ambiente o incluso controladores que le permiten interactuar el entorno virtual. Algunos ejemplos de estos equipos se tratarán en este punto.

5.1 Tipos de digitalización de la realidad física

Actualmente existen tres tecnologías para la digitalización de la realidad. En primer lugar, la realidad virtual, la cual propone que el usuario interactúe dentro de un entorno completamente virtual a través de dispositivos como un smartphone. En segundo lugar, la realidad aumentada, cuyo objetivo es superponer elementos virtuales sobre la realidad. Por último, la realidad mixta, que combina los dos conceptos explicados anteriormente. A continuación, se analizan con más detalle estas tecnologías.

5.1.1 Realidad virtual

El término de Realidad Virtual es común para describir **un contenido que puede reproducirse mediante dispositivos digitales** como gafas de realidad virtual o smartphones [82]. Según la RAE, se define como representación de escenas o imágenes de objetos producida por un sistema informático, que da la sensación de su existencia real.

El concepto de la realidad virtual viene desarrollándose desde el año 1840 en el que Charles Wheatstone creó el primer estereoscopio [83], el cual consistía en una especie de gafas en las que se situaban dos imágenes distintas en cada ojo, creando una sensación de profundidad.

A partir de los años 70, tuvo un auge en el ámbito académico y de entrenamiento multidisciplinario, siendo utilizada para el entrenamiento en algunas de las bases de la fuerza aérea de los EEUU e incluso la NASA llegó a emplear esta tecnología para el entrenamiento de astronautas [84].

En el ámbito cinematográfico, la aplicación de esta tecnología ha estado muy presente en aquellas producciones del género de ciencia ficción. Un claro ejemplo de ello es *Tron*, película de ciencia ficción de 1982 con una propuesta estética muy avanzada para la época en la que un programador es absorbido por un universo virtual.

En la década de los 90, con el desarrollo del mundo de los videojuegos, esta tecnología migra del área educativa al mercado del entretenimiento y aparecen las gafas de realidad virtual *Sega VR*.

En el año 1995, Chet Dagit y Bob Jacob crear *Cave-Link*, una herramienta de 270 grados que permitía la inmersión total del usuario.

Ya en la década de los 2000, grandes empresas se adentraron en esta tecnología como por ejemplo Google con su servicio *Street View*.

En 2016 se produjo la salida al mercado por parte de HTC de su HTC VIVE SteamVR, visor que permite ver vídeos de realidad virtual con seguimiento de posición basado en un sensor [84], acercándose más a los equipos existentes hoy en día.

En la actualidad, la aplicación de la realidad virtual participa en ámbitos como la medicina o la ingeniería. Con el desarrollo de herramientas con mayor resolución de pantalla, sensores y giroscopios el empleo de esta tecnología se expande de forma extraordinaria. Incluso aparece la posibilidad de acceder a ella con una inversión reducida, como puede ser a través de un smartphone y la *Google Cardboard*. En este último caso, la pantalla se divide en dos partes en sentido vertical para generar un efecto 3D, el cual acompañado de los sensores de posición del smartphone (acelerómetro, giroscopio y brújula) que transmiten a la cámara virtual cualquier movimiento que realicen los usuarios, generan una sensación cercana a la realidad.

Es importante señalar que existen dos tipos de Realidad Virtual, la inmersiva y no inmersiva. La RV inmersiva permite que los usuarios se vean sumergidos por completo en el mundo virtual tridimensional, generado de forma artificial. En este caso, el usuario interactúa con el ambiente virtual mediante equipos que capturan su posición y movimiento. El segundo tipo, es similar a una navegación realizada por ordenador. Este segundo tipo ha sido difundido y aceptado ampliamente debido al reducido equipo necesario para ingresar al mundo virtual aunque, a diferencia del primero, el usuario no puede percibir sensaciones directas del mundo virtual [84].

Las aplicaciones de la realidad virtual en la vida cotidiana son numerosas pero esta tecnología presenta una serie de ventajas y desventajas. De acuerdo con [84], entre las ventajas se encuentran la capacidad de poder aprender a manejar objetos (para personas con cierta minusvalía, por ejemplo) o entrenamiento en zonas peligrosas. Sin embargo, existen desventajas como el costo elevado y la complejidad del desarrollo de un mundo virtual, dificultades para manejar los mandos y controles o el constante mantenimiento de los equipos.

Sin embargo, la RV y su funcionamiento cada vez están haciendo más mella en la sociedad y es muy probable que dentro de unos años esta tecnología pase a formar parte de la vida cotidiana.

5.1.2 Realidad aumentada

La realidad aumentada se constituyó como una rama de la tecnología en el año 1990, gracias a los avances logrados por el investigador Boeing Tom Caudell [81].

La realidad aumentada (AR) es un término que agrupa una serie de tecnologías que permiten superponer

elementos virtuales sobre la visión del mundo real. De esta manera, los dispositivos añaden información virtual a la información física ya existente [81].

La realidad aumentada (AR) es una tecnología que permite usar contenido virtual en el mundo físico [82]. Existen numerosas aplicaciones de esta tecnología dentro del sector AEC. Por ejemplo, a través de un código QR (escaneado por un smartphone) o un plano, se podría ver su representación 3D justo encima. En la siguiente figura se muestra un ejemplo.



Figura 5-1- Ejemplo práctico de Realidad Aumentada. Fuente: Realidad en aumento, [81]

Otro ejemplo de la realidad aumentada se da en el ámbito de la educación, donde ha ayudado a la creación de programas de estudio en museos, exhibiciones y parques temáticos, aprovechando las características de esta tecnología para mostrar a los alumnos información sobre objetos y lugares [81].

Por otra parte, existen grandes diferencias entre RV y AR pues mientras que la realidad aumentada se centra en agregar elementos virtuales a la realidad, la realidad virtual se centra en la creación de mundos virtuales desde cero [81].

Otra diferencia entre la realidad virtual y la realidad aumentada es que en la realidad virtual el usuario tiene una experiencia en primera persona en un mundo rodeado de objetos dispuestos en las tres dimensiones espaciales. En la realidad aumentada, el usuario no queda supeditado al mundo virtual, sino que actúa dentro del mundo real por lo que tiene mayor libertad de movimiento. Además, la AR se considera más económica que la RV pues no se necesita ningún equipo extra para disfrutar de un software de AR [81], siendo necesario en la RV.

5.1.3 Realidad mixta

En algunas ocasiones las diferencias entre la realidad aumentada y la realidad virtual no son obvias y resulta difícil distinguir la línea que separa ambas tecnologías. Aquí es donde nace la realidad mixta.

La realidad mixta es una tecnología que busca lo mejor de ambas realidades para ofrecer una experiencia en la que el entorno del usuario siga siendo su propia realidad, a la que se incorporan elementos virtuales en tiempo real [85].



Figura 5-2- Aplicación de la tecnología de Realidad Mixta. Fuente: [86]

De acuerdo con [86], la realidad mixta trata de llevar el mundo real al mundo virtual. La idea es generar un modelo 3D la realidad y sobre él superponer información virtual, combinando así la realidad virtual y la realidad aumentada. Los equipos de realidad mixta poseen sensores de posición y cámaras que recogen la información del entorno para combinarla con el mundo virtual e interactuar con él.

Como ejemplo práctico, imaginemos una habitación donde se quieren colocar diferentes muebles y modificar su posición. En este caso, la realidad mixta permitiría ver el estado actual de la habitación y colocar unos muebles virtuales que se verían a través de las gafas de realidad mixta. Además de colocarlos, ofrecería la posibilidad de modificar la orientación o la posición de los muebles con un movimiento de manos pues las gafas poseen cámaras y sensores que recogen los movimientos y la posición de nuestras manos, siendo capaz de analizar estos movimientos y convertirlos en instrucciones para así interactuar con los elementos virtuales.

5.1.4 Conclusión

Tras el análisis de las diferentes tecnologías existentes, se decide utilizar la realidad virtual para el desarrollo del presente TFM. La característica diferencial de esta tecnología respecto a las otras dos es que permite al usuario desplazarse a un emplazamiento diferente y actuar con él sin necesidad de salir de la oficina o gabinete. Para ello, es necesario generar modelos 3D que además tengan información asociada para así poder interactuar con el entorno virtual. Esta aplicación tiene un amplio desarrollo dentro del sector AEC pues, con la generación de modelos BIM, se reúnen las condiciones apropiadas para generar un entorno virtual completo donde el usuario pueda sumergirse.

Además, el acceso a esta tecnología no requiere de grandes recursos pues existen modelos básicos de equipos de RV que permiten disfrutar de la experiencia de la inmersión.

5.2 Equipos de Realidad Virtual

Para conseguir que el usuario se sumerja en la simulación, es fundamental adecuar el entorno real para ello. Por ejemplo, si se quiere simular la conducción de un vehículo, es importante que el usuario se coloque en la posición del conductor. Esto se consigue con los equipos de realidad virtual existentes en el mercado. Para alcanzar este objetivo es necesario disponer de equipos adecuados y con capacidad suficiente para así conseguir que el usuario se sumerja de lleno en el mundo virtual.

Las gafas de realidad virtual son unos lentes o cascos a través de los cuales se puede experimentar la tecnología de la realidad virtual. Con los avances en realidad virtual de los últimos años, estos dispositivos se han adaptado a las nuevas propuestas y han mejorado en sus diseños y funciones. Creando un entorno simulado, se puede experimentar en primera persona la realidad virtual y sentir una inmersión total en ella [85].

Hoy en día existe una amplia gama y variedad de gafas de realidad virtual. Principalmente estos equipos se separan en dos grupos:

- Gafas RV para PC. Son dispositivos o accesorios por medio de los cuales es posible experimentar la realidad virtual. En este caso, es indispensable que el ordenador sea compatible con el formato de RV y cuente con gran capacidad para gráficos.
- Gafas RV para móvil. En este caso, se necesita un smartphone para poder disfrutar de estos equipos. A diferencia del grupo anterior, no se necesita una gran inversión ya que en este caso influyen las propiedades técnicas del smartphone para poder disfrutar de una buena experiencia. El sonido y la pantalla serán las que ofrece el smartphone.

A continuación, se define un ejemplo de cada grupo de gafas de realidad virtual para así poder diferenciar con mayor facilidad ambos equipos.

En cuanto a gafas RV para PC, un ejemplo muy conocido dentro de la oferta existente en la actualidad son las *Oculus Quest 2*. Se trata de uno de los mejores equipos para interactuar en un mundo virtual con un PC a la venta durante la primera mitad del año 2021. Este equipo posee su propio procesador, memoria RAM y almacenamiento. Además, incluye controladores que permiten al usuario interactuar.



Figura 5-3- Equipo de gafas RV Oculus Quest 2. Fuente: [87]

El ejemplo más conocido dentro del grupo de gafas RV para móvil son las *Google Cardboard*, las cuales puede montar el propio usuario y tiene un precio muy reducido. En función del smartphone, se escoge un visor adecuado y el sistema queda preparado para utilizarse.



Figura 5-4- Equipo de gafas RV Google Cardboard. Fuente: [88]

5.3 Softwares de Realidad Virtual

En la actualidad existe una amplia oferta de softwares que permiten generar espacios virtuales con los que poder interactuar, dando lugar a una experiencia de realidad virtual. Es importante diferenciar dos grupos de softwares que pueden confundir a priori. Acudiendo a un ejemplo para desarrollar este concepto con mayor claridad, pongamos que se ha realizado el modelo 3D de una estructura el cual se pretende mostrar en una reunión para estudiar el resultado final. Se puede plantar la alternativa de realizar un *render*³ para presentar el resultado. En este caso, en la oferta de softwares aparecen algunos ejemplos muy conocidos como *Lumion* o *Twinmotion*. Sin embargo, estos softwares no permiten al usuario interactuar con el entorno. Otros ejemplos de software que sí ofrecen esta opción son *Unity* y *Unreal*. Ambos son motores que poseen herramientas para el diseño y la creación de un entorno creativo. Atendiendo al objetivo del presente TFM, resultan más interesantes estos últimos softwares pues permitirán generar interacciones entre el usuario y el entorno.

Sabiendo que los softwares que resultan interesantes en este caso son *Unity* y *Unreal*, se realiza a continuación un análisis de ambos para terminar eligiendo uno de ellos.

Ambos son motores de creación de entornos virtuales que poseen unas físicas y librería predeterminadas, con lo que una gran parte del trabajo dedicado en la creación del entorno virtual se ve simplificada. Para poder disfrutar del resultado, es importante saber qué plataformas soporta cada software. Ambos soportan plataformas como Microsoft, iOS o Android, si bien cabe destacar que *Unity* se ha consolidado en los últimos años como el soporte multiplataforma por la versatilidad que ofrece [89].

Otro detalle importante reside en el lenguaje de programación empleado por cada software. *Unreal* ofrece dos tipos de lenguaje: C++ y una tecnología Blueprint Visual Scripting, el cual permite al usuario programar de una forma más sencilla al utilizar un lenguaje de programación visual. En cambio, el lenguaje utilizado en *Unity* es C#, lenguaje diseñado por Microsoft y que está orientado principalmente a objetos [89]. En este caso, para un usuario que no ha tenido contacto previo con los lenguajes de programación mencionados, la alternativa que ofrece *Unreal* con su tecnología Blueprint Visual Scripting es un factor diferencial ya que facilita la programación en caso de que sea necesaria. Esta característica será fundamental a la hora de elegir el software con el que se va a trabajar.

Un aspecto muy interesante es la documentación existente de cada software. Ambos cuentan con una base de datos muy interesante. En la web de *Unity* se encuentra un manual de usuario al cual se puede acceder a través de la siguiente URL: <https://docs.unity3d.com/Manual/index.html> . De la misma forma, *Unreal* ofrece un manual y numerosos tutoriales a los cuales se puede acceder desde la siguiente URL: <https://www.unrealengine.com/en-US/> .

³ Representación gráfica de un modelo 2D o 3D que permite una visión realista, con profundidad y textura [99] .

A la hora de generar un entorno virtual y la interacción del usuario con el mismo, resultan muy útiles los recursos adicionales ofrecidos por cada software ya que facilitan el camino hasta alcanzar el resultado final. En el caso de *Unreal* es *Unreal Engine Marketplace* la herramienta en la que se pueden encontrar recursos para la creación del entorno virtual. En ella se pueden encontrar texturas, animaciones o incluso códigos. Por otra parte, *Unity* cuenta con la *Asset Store* para ofrecer una multitud de elementos.

Por último, existen diferencias en los modelos de suscripción de ambos. Por una parte, en *Unreal* se pueden utilizar todas las herramientas de forma gratuita cuando el beneficio no supere los 3000 \$ al trimestre. En caso de que se supere, *Unreal* se quedará con un 5% de los ingresos. Por otra parte, *Unity* ofrece tres modelos de suscripción en función de los ingresos que se obtengan con su uso. En el caso de que los beneficios sean inferiores a 100.000 \$ anuales, existe la versión *Unity Personal* que resulta más adecuada. Si se superan esos beneficios pero quedan por debajo de 200.000 \$ anuales, el precio de la licencia viene a ser de 20 € al mes mientras que, si se superan, el precio de la licencia asciende a 115 € mensuales [89].

Una vez analizados ambos softwares, queda concluir con cuál de los dos se va a desarrollar el presente TFM. A priori, viendo las características que posee cada uno y analizando sus diferencias, destaca el apartado del lenguaje de programación empleado por cada software. Para un usuario que no conoce a fondo los lenguajes de programación, el hecho de que *Unreal* ofrezca la tecnología *Blueprint Visual Scripting* facilita en gran medida el trabajo y hace que la curva de aprendizaje sea favorable.

Sin embargo, para resolver la decisión del software, se realizaron varios ejemplos en cada uno de ellos. Con estos ejemplos se pretendía evaluar la dificultad a la hora de importar elementos 3D con texturas y materiales, generar interacciones del usuario con el entorno, exportación del entorno virtual desarrollado... Tras realizar estos ejemplos, se llega a la conclusión de que el trabajo con *Unreal* es más favorable pues ofrece escenas predeterminadas que reducen la preparación del entorno y, además, ofrece una amplia variedad de materiales y una interfaz accesible. Por otra parte, la programación con la tecnología *Blueprint* no requiere la necesidad de aprender un lenguaje de programación para llegar a generar códigos, lo cual es conveniente en este caso.

6 EL CASO DE ESTUDIO

Como aplicación práctica de la tecnología que se ha venido exponiendo en el presente TFM, se ha decidido realizar un análisis desde el punto de vista de la seguridad vial en un tramo de una carretera de la Red de Carreteras de Andalucía. En concreto, se trata del tramo de la A-474 correspondiente al Pk 49+700 a 50+800 de la Red de Carreteras de Andalucía, en el término municipal de Almonte (Huelva).

En el ámbito de la ingeniería de caminos, canales y puertos el análisis de la seguridad vial en carreteras tiene una importancia vital. Prueba de ello en los últimos años es el énfasis de las diferentes administraciones hacia la reducción de accidentes de tráfico, así como la gravedad de estos y la detección y erradicación de los puntos negros.

Numerosas han sido las medidas tomadas para ello, desde la intensificación de la normativa de circulación hasta una mejora de la conservación de las carreteras. Cabe destacar el hecho de que la construcción de una carretera ocupa una pequeña parte de su vida útil, siendo mucho mayor la etapa de conservación y explotación de esta.

De esta forma, en el presente punto se va a desarrollar un caso práctico de aplicación de la tecnología de nubes de puntos combinada con la Realidad Virtual al análisis de la seguridad vial de una carretera.

En primer lugar, se ha realizado un trabajo de campo en el tramo de red señalado anteriormente con el objetivo de tener una primera visión de la problemática presente en dicho tramo. Con este trabajo de campo también se pretende realizar un control de calidad de la nube de puntos sobre la que se va a trabajar para así confirmar que los datos han sido tomados correctamente y analizar si la resolución con la que se adquirió la nube de puntos es adecuada. Como nube de puntos se ha empleado la documentación ofrecida por la Dirección General de Infraestructuras de la Consejería de Fomento, Infraestructuras y Ordenación del Territorio de la Junta de Andalucía.

Más tarde, se culmina este caso práctico con el desarrollo de un entorno virtual para así analizar desde un primer punto de vista condiciones de visibilidad y seguridad en dicho tramo.

Para finalizar, se exponen las principales conclusiones extraídas tras la realización de este estudio.

Por último, antes de comenzar con el desarrollo del caso práctico, se muestran a continuación las características del equipo con el cual se elabora este proyecto.

Tabla 6-1- Características del equipo empleado

Componente	Tipo
Procesador	Intel(R) Core (TM) i7-8750H CPU @ 2.20GHz 2.21 GHz
RAM	16 GB
Tarjeta gráfica	NVIDIA GeForce GTX 1050
Sistema operativo	Windows 10 Home 64 bits
Almacenamiento	237 GB SSD / 931 GB HDD

6.1 Descripción el tramo de estudio

En este primer apartado se describe con mayor detalle el tramo de estudio. Como se mencionó anteriormente, se trata del tramo correspondiente al Pk 49+000 a 50+800 de la vía A-474 en el término municipal de Almonte (Huelva).

Este tramo comienza con una glorieta partida que da acceso al municipio de Almonte, siendo la A-474 la vía con prioridad en la intersección como se puede observar en la siguiente figura.



Figura 6-1- Inicio del tramo

Luego, se desarrolla una calzada de doble sentido, con un carril por sentido, de 7 metros de ancho (3,5 metros de anchura por carril) con arcenes de 1 metro resultando la plataforma en 9 metros de anchura.

La vía presenta tramos donde se permite el adelantamiento, siendo la velocidad máxima de 90 km/h. Además, aparecen a lo largo de este tramo cinco intersecciones en T a las cuales hay que prestar especial atención de cara a la seguridad vial.



Figura 6-2 Ejemplo de intersección presente en el tramo de estudio

De acuerdo con el Plan de Aforos de la Red Autonómica de Carreteras de Andalucía de 2019 (el más reciente a fecha de la consulta), [90], existen dos estaciones de aforo secundarias presentes en esta carretera.

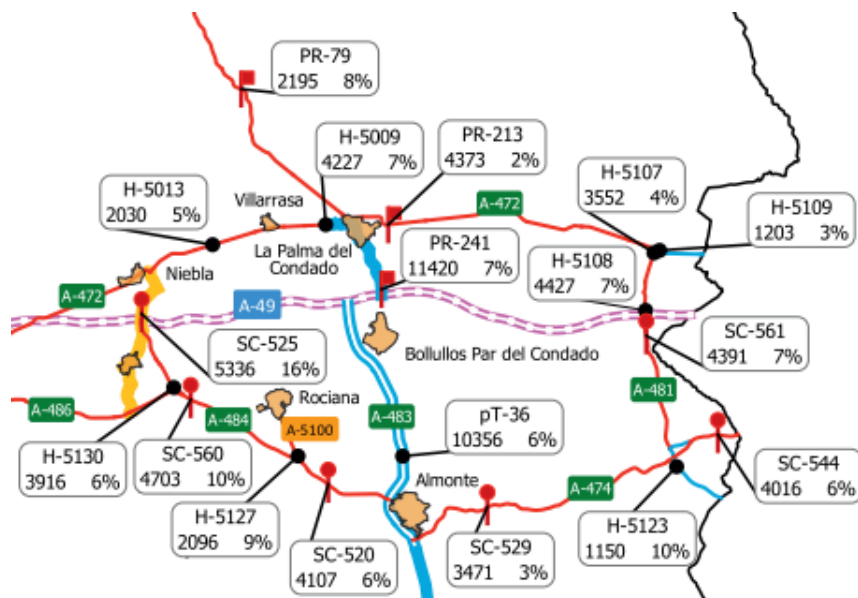


Figura 6-3- Aforos en la Red de Carreteras de Andalucía, 2019. Fuente: [90]

Sin embargo, dado que la estación de aforo más próxima al tramo en cuestión es SC-529, se consideran los datos proporcionados por ella. De esta forma, se establece que el tramo tiene una IMD de 3471 vehículos, con un 3% de vehículos pesados.

Por otra parte, cabe señalar que el trabajo de campo fue realizado durante el día y, por tanto, no se pueden extraer conclusiones respecto a la reflectancia de la señalización vertical y horizontal.

En cuanto al estado de la señalización vertical, se observa que es adecuado.



Figura 6-4- Ejemplo de señalización vertical en el tramo de estudio

En cuanto al estado de conservación del tramo, se observa que también es adecuado si bien aparecen algunas zonas en la calzada con presencia de arena perteneciente a los caminos que intersecan con la A-474.



Figura 6-5- Presencia de arena en la calzada



Figura 6-6- Presencia de arena en la calzada

Por otra parte, se ha detectado la presencia de manchas de vegetación dentro de la cuneta, así como la presencia de elementos sólidos acumulados en su interior e incluso su aterramiento. Sería conveniente actuar en estos puntos mediante la recogida de basura, limpieza y saneo y tratamiento contra el crecimiento de la vegetación en esta zona pues podría verse mermada su capacidad de evacuación de las aguas en situación de lluvia y provocar problemas de adherencia y agarre al tráfico.



Figura 6-7- Estado de la cuneta. Presencia de elementos sólidos.



Figura 6-8- Estado de la cuneta. Aterramiento



Figura 6-9- Estado de la cuneta. Presencia de vegetación

Por último, se encuentran varios puntos donde la visibilidad es reducida dentro del tramo de estudio. El problema de esta falta de visibilidad es que aparece en dos puntos de intersección, con la consiguiente reducción del nivel de seguridad vial en este tramo.



Figura 6-10- Primer punto de baja visibilidad

Este punto se encuentra en la glorieta que da comienzo al tramo de estudio. En este caso, se ve condicionada la visibilidad de los usuarios que deciden atravesar la A-474, incorporarse en sentido decreciente o hacer un cambio de sentido. Estos usuarios deben cruzar el tronco de la A-474 cediendo el paso a los usuarios que circulan por ella. Como se puede observar, el terreno natural provoca un corte en el campo de visión del usuario que puede desembocar en un accidente por colisión lateral.



Figura 6-11- Segundo punto de baja visibilidad

Este segundo punto de baja visibilidad se sitúa en la segunda intersección, en el Pk 50+070 de la margen derecha. En este caso, se ve condicionada la visibilidad de los usuarios que deciden incorporarse a la A-474 en sentido creciente (no está permitida la incorporación en sentido decreciente). Como se puede observar, el terreno natural y la vegetación provocan un corte en el campo de visión del usuario que puede desembocar en un accidente por colisión lateral.

Con esto, se da por finalizada la descripción del tramo de estudio, extrayendo las siguientes conclusiones principales:

- Buen estado de conservación de la plataforma.
- Buen estado de la señalización vertical.
- Zonas de mal estado de conservación y mantenimiento de la cuneta.
- Dos puntos de baja visibilidad.

6.2 Descripción de la nube de puntos

En el siguiente apartado se describen las principales características de la nube de puntos ofrecida por la Dirección General de Infraestructuras de la Consejería de Fomento, Infraestructuras y Ordenación del Territorio de la Junta de Andalucía. Para la lectura de este archivo, se empleará el software *ReCap Pro*.

En las siguientes figuras se puede observar que globalmente la información recogida por el escáner láser se corresponde con la realidad. En la nube de puntos se detectan las glorietas de inicio y fin del tramo, así como las tres intersecciones más importantes que se encuentran dentro del mismo. Además, también se detecta fácilmente la alineación que sigue la calzada. Al combinar la captura de información geométrica con imágenes que asignan una tonalidad RGB a cada punto, se mejora enormemente la calidad visual de la nube de puntos. En el Anexo *Información gráfica del Caso Estudio* se recoge la Figura 6-12 con mayor amplitud.



Figura 6-12- Nubes de puntos A-474



Figura 6-13- A-474. Fuente: Google Earth Pro

Uno de los parámetros más importantes a considerar a la hora de realizar un levantamiento mediante nube de puntos es la resolución, la cual debe adaptarse al objetivo del proyecto. En este caso, dado que el escáner láser se encuentra instalado en un vehículo, también es muy importante que la velocidad de circulación del vehículo sea adecuada pues una velocidad muy elevada generaría una reducción en la densidad de puntos mientras que una velocidad muy reducida, provocaría el aumento considerable y posiblemente innecesario de la densidad de puntos. Analizando con más detalle la nube de puntos, se puede ver la trayectoria helicoidal que siguen los rayos de luz del escáner láser.



Figura 6-14- Trayectoria del rayo láser

Por otra parte, como se puede observar en la siguiente figura, el escáner láser ocupa un campo reducido y recoge toda la información geométrica y visual de aquello con lo que interseca el rayo láser. Dado que en este caso el escáner láser, al formar parte de un vehículo, circulaba por el interior del carril de la A-474, se recoge la información relativa a los elementos colindantes con esta carretera.

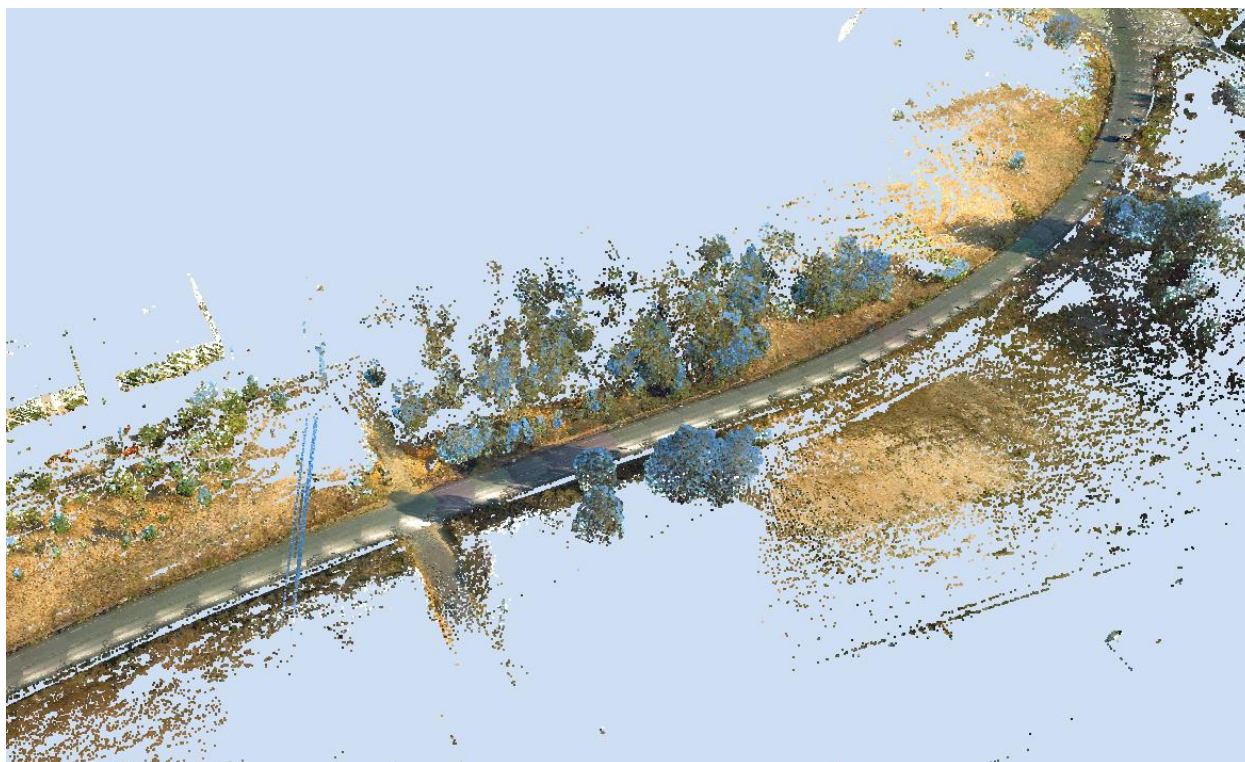


Figura 6-15- Nube de puntos A-474

De hecho, la captura de esta información por parte del escáner llega incluso a recoger una línea eléctrica que cruza la A-474, como se refleja en la siguiente figura. De la misma forma, también se recoge toda la vegetación incluida en el campo de visión del escáner, la señalización vertical y horizontal...

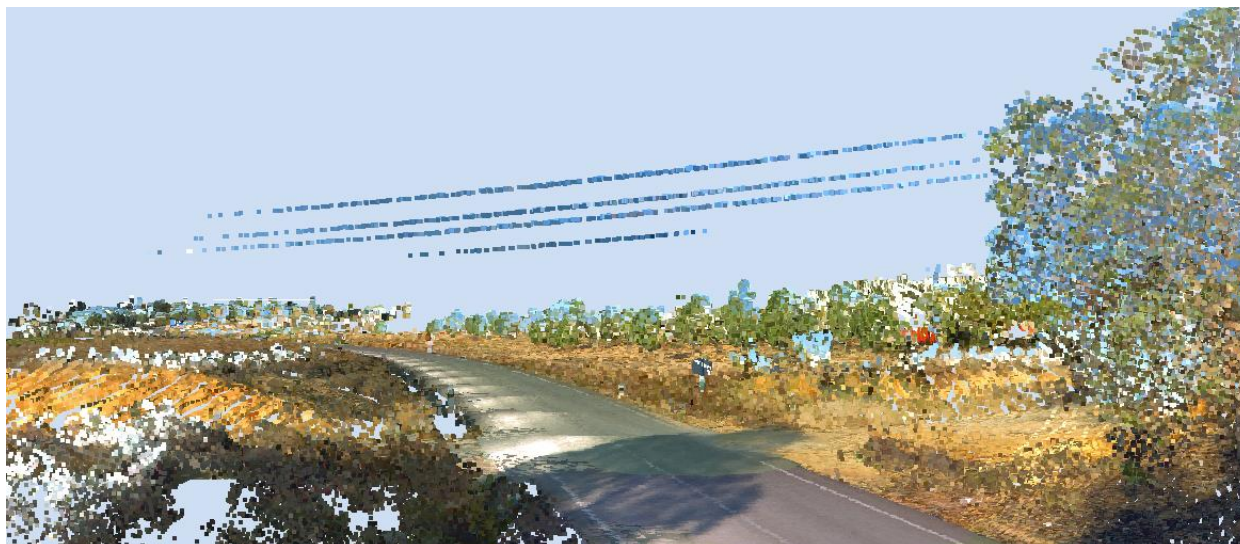


Figura 6-16- Línea eléctrica captada por el escáner láser

Por tanto, se demuestra aquí la gran capacidad de esta tecnología para poder volcar la información real en un archivo digital.

Si bien esta característica es una de las principales ventajas de esta tecnología dentro del mercado, hay que prestar especial atención a qué información se pretender recoger. En función del objetivo, los requerimientos de resolución, nivel de detalle ... cambiarán.

A continuación, se muestran unos ejemplos donde se compara el estado real frente a la información geométrica capturada por la nube de puntos.







6.3 Control de calidad de la nube de puntos

En el presente apartado se realizará una comparación de la información recogida en la nube de puntos con la información recogida en el trabajo de campo, con el objetivo de realizar un control de calidad de la nube de puntos obtenida por el escáner láser. Si bien existen numerosos casos que confirman la alta capacidad de representación de la realidad por parte de esta tecnología, es conveniente realizar la comprobación pues las propiedades de las nubes de puntos cambian. En este caso, se analizarán mediciones en la nube de puntos y la calidad con la que se ha recolectado la información referente a la señalización vertical.

Antes de comenzar con estos análisis, cabe destacar el hecho de que existe una zona en la glorieta donde finaliza el tramo de estudio en la cual no se obtiene información geométrica. Por tanto, existe un espacio donde la nube de puntos está vacía.



Figura 6-17- Tramo sin información geométrica

En primer lugar, se analizan las mediciones. Para ello, se ha medido en la dirección que sigue el eje de la calzada la distancia entre puntos con el objetivo de conocer el margen de error. Se observa que existen zonas donde el espacio entre puntos es de 11 cm. Es importante tener en cuenta este valor cuando se quieran realizar mediciones en dicha dirección pues se pueden cometer errores de 11 cm.

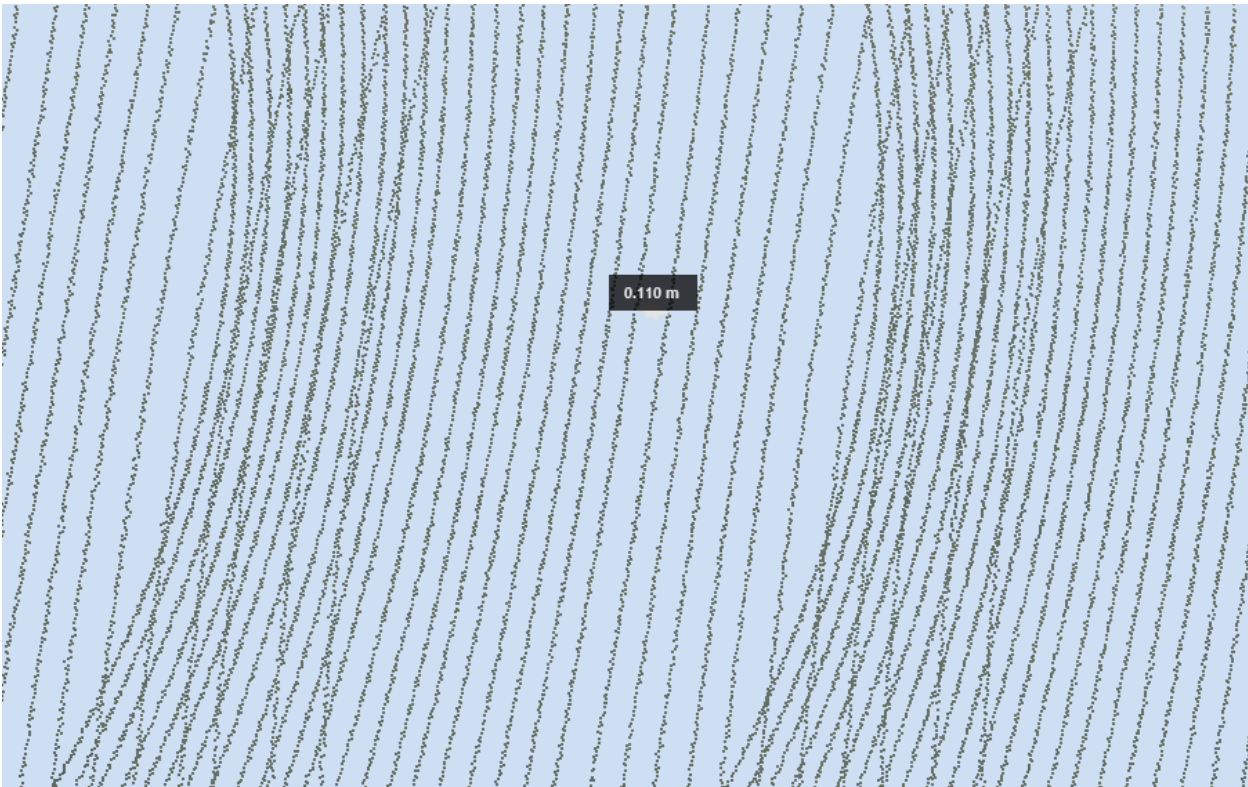


Figura 6-18- Espacio entre puntos en la dirección del eje de la calzada

Ahora bien, con el objetivo de comprobar que las mediciones que se realizan en la nube de puntos son fiables, considerando que existe el error mencionado anteriormente, se tomaron medidas de referencia en el tramo de estudio. Estas medidas corresponden a los siguientes puntos.

- Longitud de la señalización horizontal en la isleta izquierda de la cuarta intersección.



Figura 6-19- Primera medida

- Longitud de las líneas discontinuas de la señalización horizontal en la tercera intersección, ordenadas de derecha a izquierda según la siguiente figura.



Figura 6-20- Segunda medida

- Longitud (medida 3.1) y anchura (medida 3.2) de una de las marcas horizontales presentes en el interior de las isletas en la glorieta de inicio del tramo.



Figura 6-21- Tercera medida

En la siguiente tabla, se hace una comparativa entre las medidas reales y las de la nube de puntos, junto con el error relativo.

Tabla 6-2- Error relativo

	Medida 1	Medida 2.1	Medida 2.2	Medida 2.3	Medida 3.1	Medida 3.2
Nube de puntos	8,26	1,04	0,96	0,95	2,12	0,43
Realidad	8,35	1,08	0,99	0,97	2,15	0,41
Error relativo	1,08 %	3,70 %	3,03 %	2,06 %	1,42 %	4,88 %

Como se puede observar, en ningún caso el error en la medición supera el 5 %. Cabe destacar el hecho de que cuanto menor sea la medición que se quiere realizar, mayor será la probabilidad de obtener un error elevado.

Este resultado es lógico pues en el caso de que se trabaje con medidas del orden del error (11 cm) es más fácil que el error aumente como ocurre en la medida 3.2.

A continuación, se analizará el nivel de detalle con el que se ha captado por parte del escáner láser la información correspondiente a la señalización vertical. Se estudiarán también los casos de representación de hitos de arista e hitos kilométricos.



Observaciones: Sería posible determinar el contorno y la posición en la que se encuentra la señal, pero resulta imposible identificar qué información contiene en su interior.



Observaciones: En cuanto a la cartelería presente en el tramo de estudio, ocurre el mismo problema que se ha señalado anteriormente. El contorno y la posición son fácilmente identificables pero la información contenida en su interior no puede distinguirse.





Observaciones: En la glorieta sí pueden detectarse algunos textos debido a que la densidad de puntos en esta zona es mucho mayor. Por tanto, se demuestra que con esta tecnología existe la posibilidad de reconocer textos e información contenidos en la señalización.



Observaciones: La representación del hito kilométrico no es suficiente para identificar la información contenida en él. Sin embargo, se puede distinguir su posición y su contorno a grandes rasgos.



Observaciones: En este caso, se puede distinguir el hito de arista (rojo) e incluso la vegetación existente en la margen derecha de la plataforma con un buen nivel de detalle. Sin embargo, la señalización vertical (amarillo) no se ha recogido con un nivel de detalle adecuado.

Una vez se han expuesto todas las casuísticas, se señalan las conclusiones extraídas del control de calidad de la nube de puntos.

- En cuanto a las mediciones, se concluye que la resolución de la nube de puntos debería ser mayor si el objetivo es medir sobre ella. En el caso de que el objetivo sea obtener un orden de magnitud de la medición que se quiere realizar, entonces se considera que el nivel de resolución es adecuado.
- En cuanto a la representación de la señalización vertical, se concluye que la resolución debería ser mayor en caso de que se pretenda realizar un inventario de la señalización a partir de la nube de puntos. Si el inventario se realiza con apoyo de trabajo de campo y la nube de puntos se emplea para la localización de la señalización, entonces se considera que la resolución es adecuada.

6.4 Generación de la superficie 3D

De cara al modelo de Realidad Virtual, se necesita generar un objeto 3D con el que poder interactuar en el entorno virtual. En este caso, el objeto que se necesita modelar es la superficie de la plataforma más una franja exterior con el objetivo de incluir la cuneta y aportar mayor realismo a la conducción (en caso de salir de la plataforma, se apreciará el desnivel de la cuneta). Para ello, se emplea la información recogida en la nube de puntos.

En el presente caso de estudio se han propuesto dos flujos de trabajo diferenciados siendo el objetivo final la obtención del modelo 3D de la superficie. A continuación, se muestra esquemáticamente cuáles han sido los flujos seguidos:

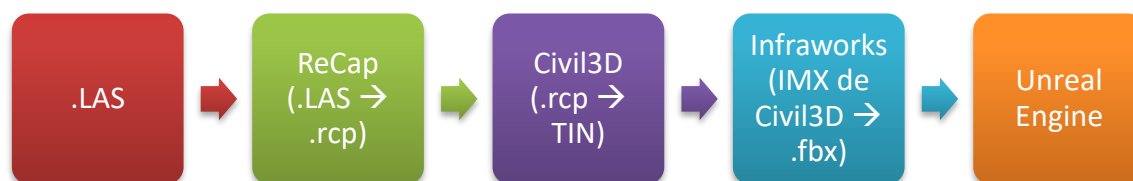


Figura 6-22- Flujo de trabajo 1



Figura 6-23- Flujo de trabajo 2

En el primer flujo de trabajo, se parte de la nube de puntos inicial, sin ser editada, en el formato .LAS (es el formato de origen de la nube de puntos). Con este archivo, se realizan las modificaciones necesarias en *ReCap Pro*, como eliminación del ruido o eliminación de puntos. Una vez finalizado este proceso, se exporta la nube de puntos resultante al formato propio de *ReCap Pro*, .rcp. Es conveniente utilizar este formato, propio de Autodesk, porque en este flujo se emplean softwares de dicha compañía. El siguiente paso sería importar la nube de puntos en *Civil3D*. Una vez dentro de *Civil3D*, se genera la superficie TIN a partir de la nube de puntos. Una vez generada la superficie, se exporta el dibujo a formato .imx para así importarlo en *Infraworks*. Ya en el entorno de *Infraworks*, se importa el archivo .imx georreferenciado y se añade una ortofoto la cual da textura realista al modelo 3D. Por último, se exporta a .fbx, quedando así listo para llevarlo al entorno de Realidad Virtual.

En cuanto al segundo flujo de trabajo, también se comienza con la nube de puntos inicial en el formato .LAS.

Luego, se emplea el software *CloudCompare* para editar la nube de puntos y cambiar su formato a .ply. Este es el formato que acepta el software *MeshLab*, el cual se va a emplear para generar el objeto 3D. Con *MeshLab*, se realiza un mallado de la nube de puntos importada con el que se genera un objeto 3D en formato .obj. Es importante señalar que este software emplea los valores RGB de cada punto para darle textura al objeto 3D, por lo que no es necesario añadir la ortofoto. Con esto, una vez generado el objeto 3D queda listo para ser importado en el entorno de Realidad Virtual.

Una vez explicados ambos flujos de trabajo, se realiza una comparativa entre ellos para determinar cuál es el más adecuado. Cabe destacar que todos los softwares empleados en el primer flujo forman parte de Autodesk mientras que los empleados en el segundo flujo son softwares libres, considerándose esta como la diferencia más importante.

Para poder compararlos, se ha realizado una prueba en cada flujo de trabajo con una pequeña región de la nube de puntos. A continuación, se muestran los modelos 3D generados por cada uno.

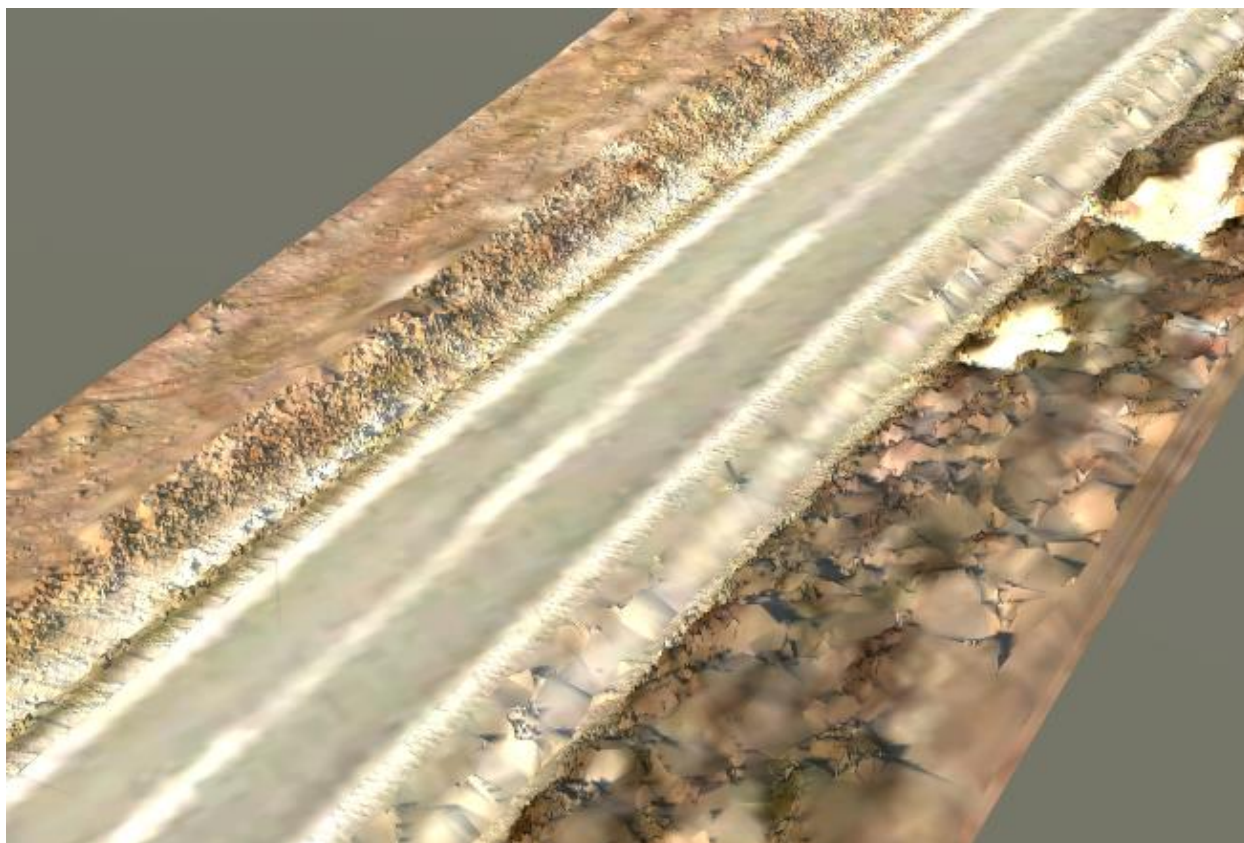


Figura 6-24- Modelo 3D con *Infracore*

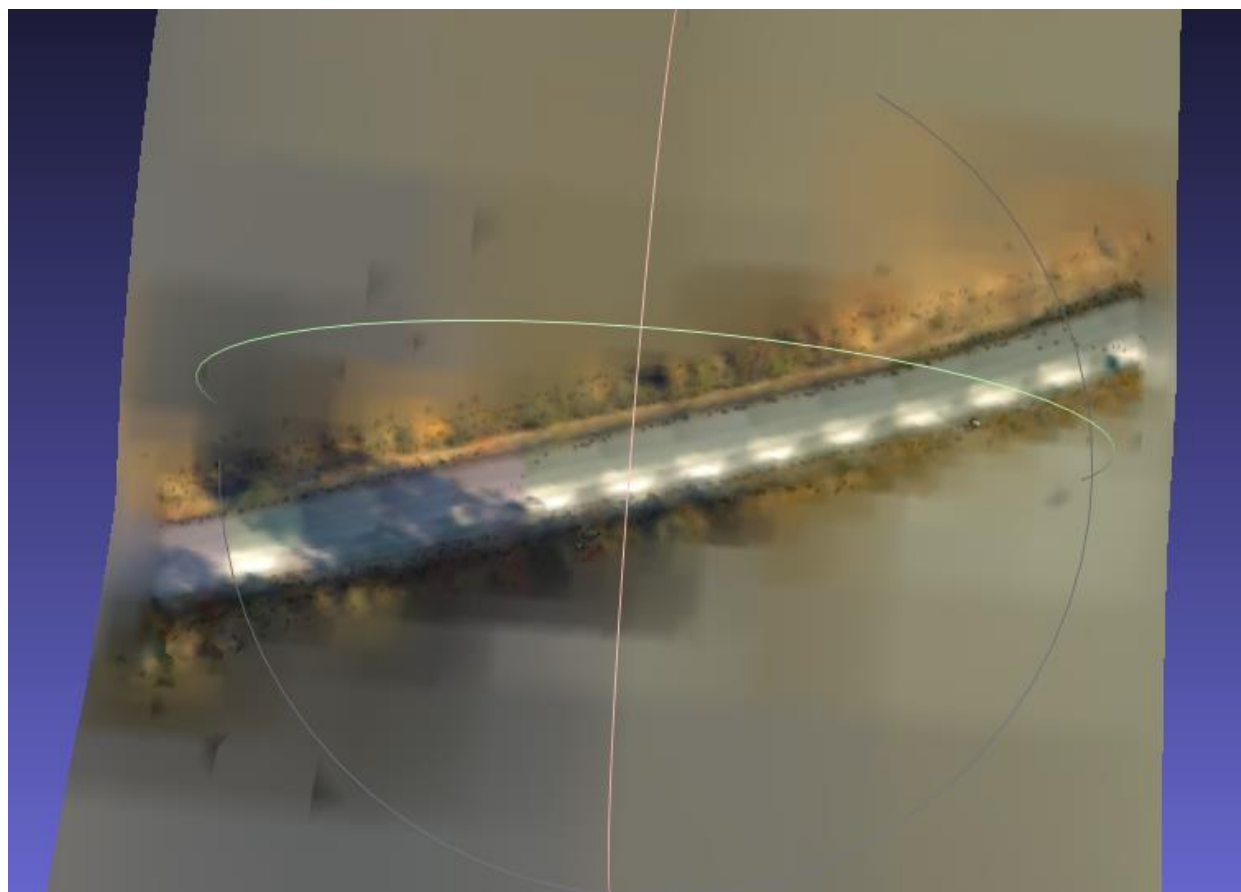


Figura 6-25- Modelo 3D con MeshLab

Se puede observar por tanto que el resultado obtenido con el primer flujo de trabajo, en este caso, es de mayor calidad. Por ello, se decide finalmente trabajar con los softwares del paquete Autodesk.

Tras determinar con esta prueba qué softwares se van a utilizar, se señalan a continuación una serie de consideraciones a la hora de trabajar con el modelo completo. La mayor parte del trabajo para crear el modelo 3D se localiza en la generación de la superficie. En primer lugar, es conveniente realizar una limpieza de la nube de puntos para trabajar con archivos de menor tamaño. Dado que la información relevante en este caso es la plataforma y la cuneta, la nube de puntos depurada queda así.



Figura 6-26- Nube de puntos editada

Luego, a la hora de generar la superficie, *Civil3D* emplea todos los puntos existentes. Debido a la imprecisión

de la medición del escáner láser y las trayectorias del escáner láser se crea una superficie escalonada como se puede observar en la siguiente figura.

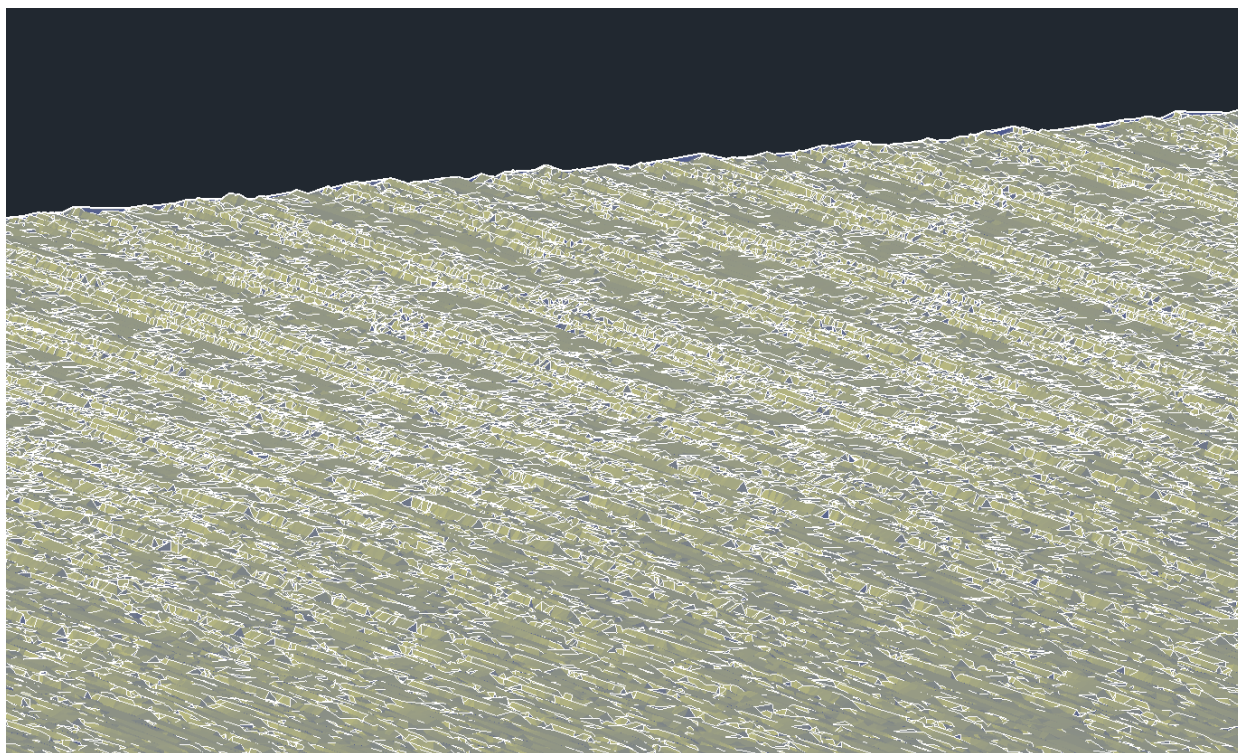


Figura 6-27- Superficie escalonada

Para solucionar este problema, se emplean las herramientas de simplificación de superficie, además de suavizar la superficie, quedando el siguiente resultado.



Figura 6-28- Superficie simplificada y suavizada

Como se puede observar, este software genera una superficie TIN que no tiene textura. Sin embargo, este problema se soluciona al llegar a *Infraworks* donde se añade textura a la superficie al importar una ortofoto. En este caso la ortofoto se ha descargado del IGN, [91]. Concretamente, se ha empleado la ortofoto PNOA máxima actualidad *PNOA-MA-OF-ETRS89-HU29-H50-1001.ECW*. Por último, se muestra en la siguiente figura el

resultado final.



Figura 6-29- Modelo 3D en *Infraworks*

6.5 Creación del entorno virtual

Por último, una vez se tiene el modelo 3D de la superficie con su correspondiente textura, se crea el mundo virtual. Para ello, se emplea la plantilla denominada *Vehicle* pues ofrece un vehículo interactivo que permite el movimiento dentro del entorno virtual en la posición del conductor (primera persona) o desde una vista exterior del vehículo.

Una vez elegida esta plantilla se adapta el entorno virtual en función del objetivo que se pretende conseguir, que en este caso es dotar de realismo a la escena para ofrecer la sensación de que se estuviera circulando dentro del tramo de estudio. Para ello, se añadirán efectos ambientales como la posición del sol que en este caso es la siguiente:

Tabla 6-3- Localización representativa del tramo de estudio

Latitud	Longitud	Zona horaria
37,25° N	-6,51° W	UTC+1

Un aspecto fundamental para conseguir este objetivo, además de importar el modelo de la plataforma generado junto con su textura, es el hecho de añadir la nube de puntos. Dado que, como se ha comprobado en el control de calidad, la nube de puntos recoge de forma fidedigna la información geométrica y visual, su inclusión en el mundo virtual aportaría un grado de realismo superior.

Una vez incluida la nube de puntos, la plataforma y las condiciones ambientales como la posición del sol se consigue el siguiente resultado.



Figura 6-30- Escena en tercera persona



Figura 6-31- Escena en primera persona

Como se puede observar, con la precisión que ofrece la nube de puntos se permite hacer análisis de visibilidad pues queda registrada la vegetación y demás obstáculos existentes. Además, ofrece un aspecto realista al entorno e incluso se observa el efecto túnel que provoca el aumento de la velocidad de circulación, disminuyendo así el detalle con el que se observan los obstáculos presentes en los laterales de la visión del conductor.

Generado el modelo de realidad virtual, se da comienzo al análisis de la seguridad vial en el tramo de estudio de la vía convencional A-474.

6.6 Análisis cualitativo de la Seguridad Vial

Para finalizar con el desarrollo del caso práctico, se realiza un análisis cualitativo de la seguridad vial en el tramo de estudio el cual consistirá en el análisis de aquellos puntos con baja visibilidad a causa de la presencia de obstáculos, así como la incidencia de la posición del sol. En primer lugar, se determinarán estos puntos a partir de un recorrido en tercera persona y luego se analizarán con más detalle empleando la vista en primera persona, en la posición del conductor del vehículo. En lo referente a la incidencia sobre la visibilidad del sol, se ha georreferenciado la posición de este con el objetivo de obtener resultados que se correspondan con la realidad. Los parámetros elegidos para el posicionamiento son los recogidos en la *Tabla 6-3*.

Antes de comenzar con el análisis cualitativo, es conveniente destacar que, debido a que las imágenes han sido obtenidas mientras el vehículo estaba circulando, el entorno aparece borroso. Tiene sentido que se de esta situación pues la cámara con la que se está viendo la escena se mueve solidariamente con el vehículo, y por ello el vehículo se observa con gran detalle y claridad mientras que el entorno virtual, al estar moviéndose respecto al vehículo, aparece borroso.

Por otra parte, este análisis cualitativo servirá para determinar aquellos puntos o situaciones que requieran un estudio cuantitativo con más detalle el cual se propone para futuras trabajos de investigación.

Por último, el estudio cualitativo se ha ordenado de la siguiente forma:

- Zona de visibilidad reducida en la calzada en sentido creciente.
- Zona de visibilidad reducida en la calzada en sentido decreciente.
- Zona de visibilidad reducida en intersección.
- Efecto de la posición del sol.

6.6.1 Zona de visibilidad reducida en la calzada en sentido creciente

Tras analizar el tramo de estudio, se observan dos zonas donde la visibilidad del conductor se reduce circulando en sentido creciente.

6.6.1.1 Zona 1

Esta zona se encuentra en el inicio del tramo de estudio. La problemática se genera por la aparición de vegetación densa en el borde derecho de la plataforma, la cual restringe el campo de visión del conductor en el trazado de la vía que describe una alineación curva hacia la derecha.



Figura 6-32- Punto de baja visibilidad. Pk 49+815 Sentido creciente



Figura 6-33- Punto de baja visibilidad. Pk 49+815 Sentido creciente. Primera persona

Como se puede observar, desde el punto de vista del conductor el campo de visión es reducido a causa de la vegetación. Debido a que la vegetación alcanza una altura y densidad considerable, la visión del conductor no alcanza a vislumbrar con claridad un vehículo que circule en sentido decreciente.

6.6.1.2 Zona 2

En este caso, se trata de la zona de incorporación a la glorieta con la cual finaliza el tramo de estudio. Para asegurar un nivel de seguridad adecuado, es necesaria la existencia de una zona despejada donde el conductor pueda observar con claridad la presencia de otros obstáculos. En la siguiente figura se muestra un esquema que recoge la idea expuesta anteriormente.

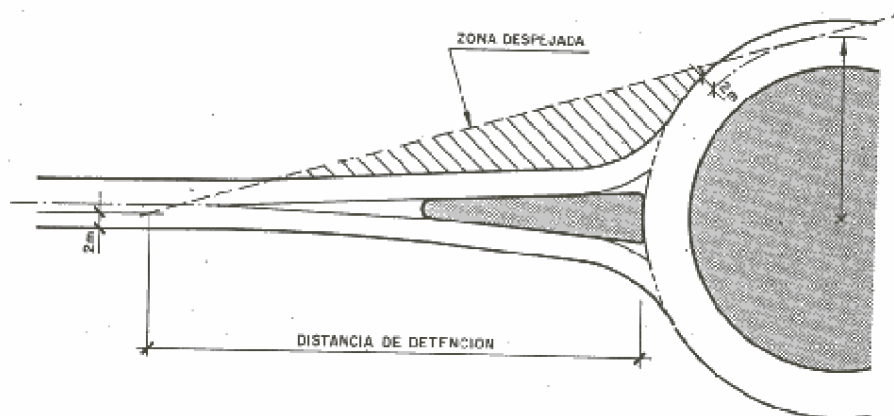


Figura 6-34- Esquema

A continuación, se muestra la zona en las siguientes figuras.



Figura 6-35- Visibilidad entrada a la glorieta. Pk 50+700 Sentido creciente.



Figura 6-36- Visibilidad en la glorieta. Pk 50+700 Sentido creciente. Primera persona

Como se puede observar, la presencia de vegetación en ambas márgenes provoca que el campo de visión del conductor sea reducido.

6.6.2 Zona de visibilidad reducida en la calzada en sentido decreciente

Tras analizar el tramo de estudio, se observan dos zonas donde la visibilidad del conductor se reduce circulando en sentido decreciente.

6.6.2.1 Zona 1

Como era de esperar, en el sentido decreciente se produce una situación idéntica a la estudiada en el apartado anterior. La presencia de la vegetación vuelve a restringir el campo de visión del conductor del vehículo.



Figura 6-37- Punto de baja visibilidad. Pk 50+050 Sentido decreciente



Figura 6-38- Punto de baja visibilidad. Pk 50+050 Sentido decreciente. Primera persona

De nuevo, el campo de visión del conductor se ve limitado por la vegetación existente en los contornos de la plataforma. Esto provoca que no sea posible observar un vehículo que circule en sentido creciente con una distancia suficiente.

6.6.2.2 Zona 2

Conforme se avanza en el tramo de estudio, aparece otra zona donde se restringe el campo de visión del conductor. Esta zona se ha detectado al circular en sentido decreciente, justo en la transición entre las marcas viales horizontales discontinuas y continuas. La alineación de la vía cambia de orientación, moviéndose hacia el este, iniciando un tramo de visibilidad reducida para el conductor que circula en sentido decreciente.



Figura 6-39- Punto de baja visibilidad. Pk 50+410 Sentido decreciente



Figura 6-40- Punto de baja visibilidad. Pk 50+410 Sentido decreciente. Primera persona

Como se puede observar, la alineación de la vía desaparece para el conductor debido al cambio de orientación, la presencia de vegetación y la pendiente que sigue la carretera.

6.6.3 Zona de visibilidad reducida en intersección

A lo largo del tramo de estudio se encuentran cinco puntos de intersección en T. Todos ellos se resuelven en condiciones de visibilidad aceptables salvo uno. Esta intersección se encuentra en el Pk 50+070, en la cual los vehículos deben incorporarse a la vía, que establece el límite de velocidad en 90 km/h.



Figura 6-41- Visión del conductor en sentido decreciente

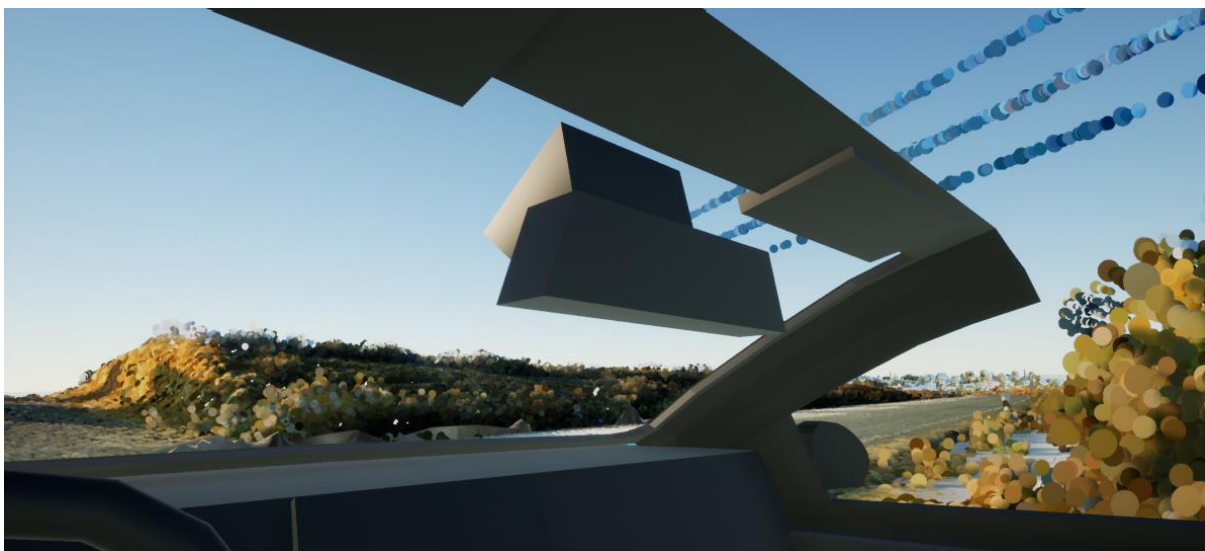


Figura 6-42- Visión del conductor en sentido creciente

Como se puede observar, desde el punto de vista del conductor existen dos situaciones claramente diferenciadas. La visibilidad cuando el conductor orienta su mirada en sentido creciente (Figura 6-42) es aceptable pues la longitud visible de la vía es considerable y la vegetación no provoca ningún impedimento. Sin embargo, si orienta su mirada en sentido decreciente (Figura 6-41), la presencia de una alineación curva provoca que la longitud de la vía presente en el campo de visión del conductor sea reducida. Además, la presencia de vegetación y un gran talud hace que las condiciones sean aún peores.

Es importante señalar que la incorporación hacia el sentido decreciente no está permitida en esta intersección.

6.6.4 Efecto de la posición del sol

Por último, se analiza el efecto que provoca la posición del sol en cuanto a las condiciones de visibilidad del usuario. Conducir con el sol de frente en las horas de puesta y salida del sol, el reflejo del sol en el asfalto mojado o el efecto de la luz de mediodía sobre el capó de otros vehículos provoca, en muchos casos, la pérdida temporal de visión e incrementan el riesgo de accidente de tráfico (por colisión o salida de la vía) [92]. Para determinar este efecto con detalle, se ha georreferenciado la posición del sol de acuerdo con la localización del tramo de estudio.

En la siguiente figura, se puede observar el efecto de la posición del sol a una hora concreta en el tramo de estudio.

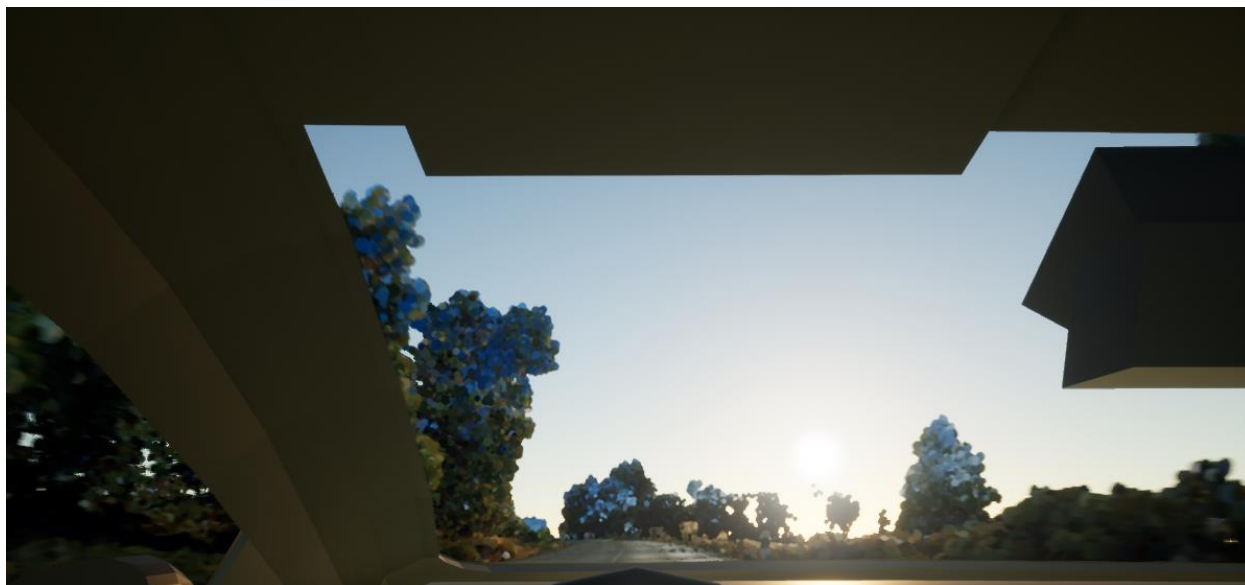


Figura 6-43- Posición del sol a las 9:00 el día 25/07 en sentido decreciente

Debido a la orientación Noreste-Suroeste que sigue el tramo de estudio y sus características, la posición del sol no afecta en gran medida a las condiciones de visibilidad durante la mayor parte del tramo. Sin embargo, se puede observar que la visión del conductor se ve influenciada por el efecto del sol en algunas zonas, lo cual puede ocasionar graves accidentes teniendo en cuenta que en el tramo de estudio se encuentran cinco intersecciones en T y zonas donde el adelantamiento está permitido.

6.6.5 Conclusión

Por último, se extraen las conclusiones más importantes del análisis cualitativo de seguridad vial realizado en el tramo de estudio.

En primer lugar, destaca la existencia del tramo contenido entre Pk 49+815 y 50+200 donde la visibilidad del conductor se ve reducida por la presencia de vegetación y la alineación curva. Además, en dicho tramo se encuentra una intersección en T. Por todo ello, la seguridad vial en este tramo se ve comprometida. Es conveniente señalar que, en dicho tramo, la velocidad máxima es de 90 km/h y se prohíbe el adelantamiento.

Por otra parte, se llega a la conclusión de que el efecto de la posición del sol es en cierta medida desfavorable para aquellos vehículos que circulan por este tramo durante el amanecer o atardecer. Esto conlleva la correspondiente reducción de la visión por parte del conductor desembocando en una reducción de la seguridad del tramo.

Con el objetivo de determinar con un mayor nivel de detalle las condiciones de seguridad, sería conveniente la realización de un estudio cuantitativo para obtener distancias de parada, de decisión y de cruce. Para dicho cálculo, se propone en el siguiente apartado el desarrollo de una herramienta que permita analizar la seguridad vial usando el entorno virtual generado en el presente TFM.

7 PROPUESTA DE HERRAMIENTA RV-SEG VIAL

El objetivo que se pretende conseguir con el desarrollo del presente capítulo es el establecimiento de las bases para el desarrollo de aplicaciones dedicadas al análisis de seguridad vial en carreteras empleando la realidad virtual.

Esta tecnología ofrece un gran potencial de cara a mejorar la exposición visual de los proyectos que se desarrollan en el sector AEC. Como se ha podido comprobar con el desarrollo del caso práctico, permite al usuario teletransportarse a un emplazamiento desde su oficina o lugar de trabajo. Sin embargo, la utilidad de esta tecnología no queda ahí. El empleo de motores como *Unreal Engine* posibilitan el desarrollo de algoritmos a través de la programación, ampliando enormemente las aplicaciones de esta tecnología.

En el caso de los análisis de seguridad vial de carreteras, este aspecto adquiere un papel fundamental para así conseguir un análisis cuantitativo más detallado. Como se ha visto anteriormente, el tramo de estudio se corresponde con un tramo en fase de explotación. En este caso resulta interesante enfocar el análisis al cálculo de distancias de visibilidad, cálculo de distancia de seguridad entre vehículos y simulaciones de tráfico. Con esto se permitiría realizar el análisis de la seguridad durante la explotación de la infraestructura, con el objetivo de tomar las medidas adecuadas y así mejorar el nivel de seguridad.

Los algoritmos que se desarrollen tienen la gran ventaja de poder aplicarse a cualquier caso similar sin necesidad de volver a invertir de nuevo el tiempo dedicado en estos. En este punto reside la potencialidad de estos pues, aunque la inversión inicial sea elevada en relación con el resultado obtenido, esta inversión se reduce en gran medida o es prácticamente nula para el resto de los proyectos. Por ello, este apartado se enfoca en la propuesta del desarrollo de algoritmos para el análisis de seguridad vial en carreteras en fase de explotación e incluso en proyectos en fase de desarrollo.

A continuación, se exponen con mayor nivel de detalle la propuesta de las siguientes herramientas: cálculo de distancias a objetos, simulación de tráfico, cálculo de distancia entre vehículos e interacción con la señalización vertical.

Dichas herramientas pueden considerarse bloques de una principal, la cual permite realizar un análisis de seguridad vial a través del cálculo de distancias, con una simulación de tráfico y todo ello mientras se aplican las restricciones impuestas por la señalización existente en el tramo de estudio. En la siguiente figura se muestran los diferentes bloques por los que estaría compuesta la herramienta propuesta.



Figura 7-1- Diagrama de flujo de la herramienta propuesta

En el Anexo *Arquitectura de la Herramienta RV-SegVial* se recogen todos los diagramas de flujos desarrollados para la herramienta propuesta, así como el bloque al que pertenece cada uno de ellos.

7.1 Antecedentes

El análisis de seguridad vial en carreteras es una materia que se viene estudiando en los últimos años. Concretamente muchos estudios se centran en el cálculo de la distancia de visibilidad disponible para así comparar este resultado con los valores mínimos de distancia de parada, adelantamiento, decisión y cruce establecidos por los departamentos de transporte en cada país. De esta comparación se deduce qué maniobras pueden realizarse con seguridad.

Estos trabajos de investigación se realizan de forma estática, situando al observador en un punto y analizando su campo de visión a través de softwares con grandes capacidades de cálculo como *Civil3D* con su módulo de análisis de visibilidad o *ArcGIS*. Los siguientes artículos realizan estos cálculos con *ArcGIS*:

- [39] C. De Santos-Berbel and M. Castro, “Three-Dimensional Virtual Highway Model for Sight-Distance Evaluation of Highway Underpasses,” *J. Surv. Eng.*, vol. 144, no. 4, p. 05018003, 2018, doi: 10.1061/(asce)su.1943-5428.0000258.
- [41] K. González-Gómez, L. Iglesias, R. Rodríguez-Solano, and M. Castro, “Framework for 3D point cloud modelling aimed at road sight distance estimations,” *Remote Sens.*, vol. 11, no. 23, pp. 1–14, 2019, doi: 10.3390/rs11232730.
- [42] M. Castro and C. De Santos-Berbel, “Spatial analysis of geometric design consistency and roadsid distance,” 2014.
- [44] M. Castro, L. Iglesias, J. A. Sánchez, and L. Ambrosio, “Sight distance analysis of highways using GIS tools,” *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.*, vol. 19, no. 6, pp. 997–1005, 2011, doi: 10.1016/j.trc.2011.05.012.

De acuerdo con [41], el cálculo de la distancia de visibilidad disponible requiere la definición de la altura del observador y la posición y altura del objetivo. Para ello, se necesita el empleo de representaciones actualizadas y de alta resolución de la geometría de la carretera y sus elementos colindantes como el equipamiento de la carretera o la vegetación. Todos estos elementos son extraídos de forma eficiente mediante el uso de MLS (*Mobile LiDAR Systems*), el cual se ha empleado para el levantamiento topográfico del caso de estudio de este TFM.

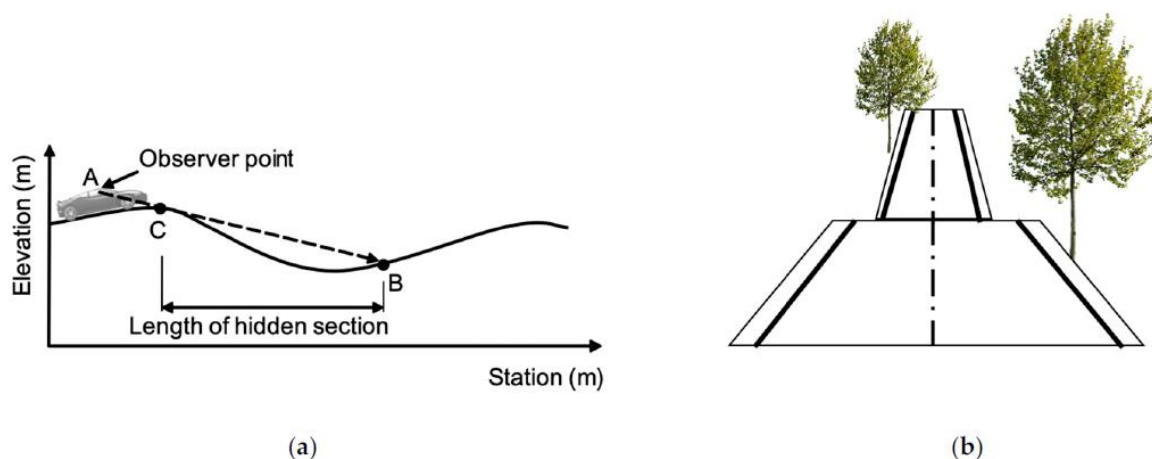


Figura 7-2- Vista oculta en una pendiente: (a) perfil vertical de la carretera; (b) vista frontal en 3D de la carretera. Fuente: [41]

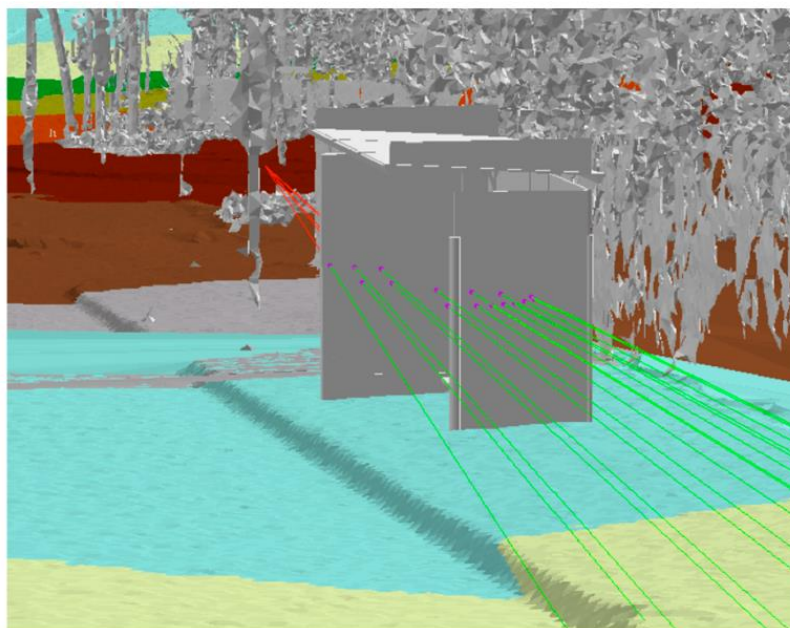


Figura 7-3- Vista 3D con líneas de visión obstruidas. Fuente: [41]

En la figura anterior, obtenida de [41], las líneas rojas representan las líneas de visión obstruidas, las verdes son aquellas que no lo están y los puntos morados indican la localización exacta donde la primera obstrucción visual fue encontrada.

En [41] se plantea el siguiente método de trabajo para la evaluación de la distancia de visibilidad.

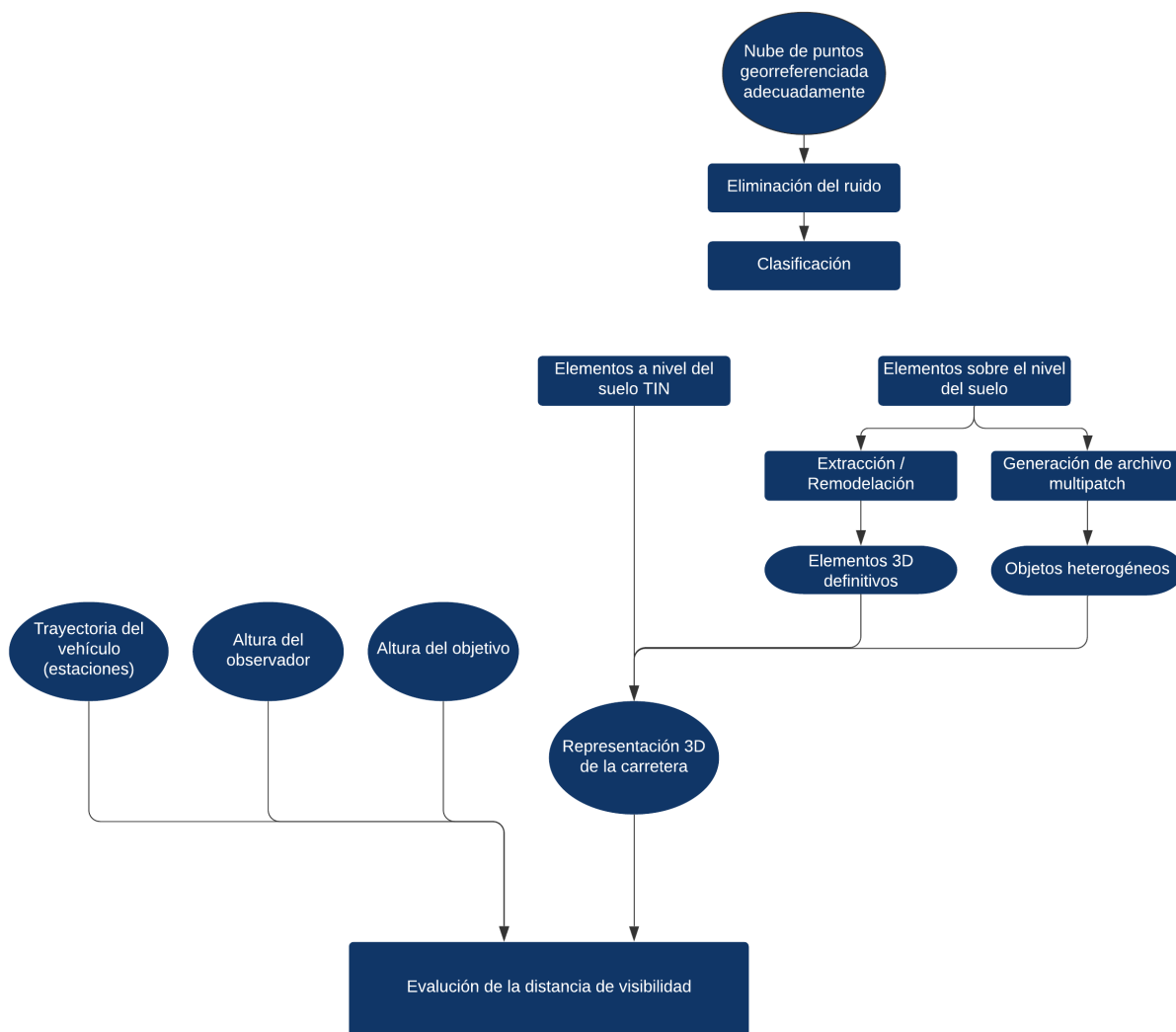


Figura 7-4- Descripción del método presentado. Fuente: [41]

La introducción de la Realidad Virtual en este ámbito permite el análisis dinámico de estas distancias conforme el usuario circula por el tramo de estudio. Por ello, se propone en el siguiente apartado el desarrollo de unos módulos de cálculo que permitan evaluar el campo de visión del usuario y la distancia a objetos para así determinar el nivel de seguridad del tramo de estudio. De esta forma, se podrían analizar condiciones de visibilidad en situaciones reales y zonas conflictivas para tomar decisiones y actuar sobre ellas.

7.2 Cálculo de distancias a objetos

El cálculo de distancias a objetos de cara un análisis de seguridad vial es fundamental. Para poder establecer el nivel de seguridad en una carretera, es importante definir la distancia de visibilidad en cada tramo de la carretera. La normativa que regula los aspectos técnicos de la visibilidad en el territorio español es la Norma 3.1 IC de trazado [93]. Según esta norma, existen las siguientes distancias y visibilidades: de parada, de adelantamiento, de decisión y de cruce. Además, se fija el punto de vista del conductor, a efectos de cálculo, a una altura de un metro y diez centímetros (1,10 m) sobre la calzada y a una distancia de un metro y cincuenta centímetros (1,50 m) del borde izquierdo de cada carril, por el interior de este y en el sentido de la marcha. De esta forma, la posición de la cámara en primera persona queda definida perfectamente.

De acuerdo con [93], se tienen las siguientes definiciones:

- Distancia de parada (D_p). Distancia total recorrida por un vehículo obligado a detenerse ante un obstáculo inesperado en su trayectoria, medida desde su posición en el momento de aparecer el objeto

que motiva la detención.

- Visibilidad de parada. Distancia dentro de un carril que existe entre un vehículo y un obstáculo situado en su trayectoria, en el momento en que el conductor puede divisarlo sin que luego desaparezca de su campo visual. La distancia se medirá a lo largo del carril.
- Distancia de adelantamiento (D_a). La distancia necesaria para que un vehículo pueda adelantar a otro que circula a menor velocidad, en presencia de un tercero que circula en sentido opuesto.
- Visibilidad de adelantamiento. Distancia disponible, medida a lo largo del eje que separa ambos sentidos de circulación, entre la posición del vehículo que efectúa la maniobra de adelantamiento y la posición del vehículo que circula en sentido opuesto, en el momento en que pueda divisarlo y sin que luego desaparezca de su vista hasta finalizar dicha maniobra.
- Distancia de decisión (D_d). Distancia medida a lo largo de la trayectoria que realiza un vehículo para que su conductor, en un entorno viario que puede estar visualmente congestionado, perciba la información proporcionada por la señalización y la existencia de una situación inesperada o difícil de percibir, las reconozca, valore el riesgo que representan, adopte una velocidad y una trayectoria adecuadas y lleve a cabo con seguridad y eficiencia la maniobra necesaria.
- Visibilidad de decisión. Distancia en línea recta entre la posición de un vehículo en movimiento (definido por el punto de vista del conductor) y el elemento que debe observar el conductor medida sobre el eje de la carretera.

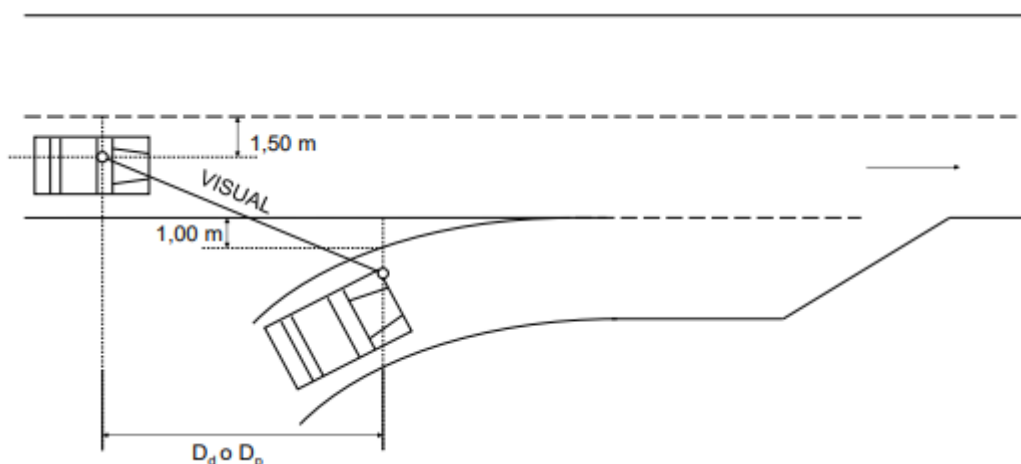


Figura 7-5- Visibilidad de decisión o de parada

- Distancia de cruce (D_c). Distancia que puede recorrer un vehículo sobre una vía, durante el tiempo que otro emplea en realizar el citado movimiento de cruce atravesando dicha vía total o parcialmente.
- Visibilidad de cruce. Distancia que precisa ver el conductor de un vehículo para poder cruzar otra vía que interseca su trayectoria, medida a lo largo de la carretera atravesada.

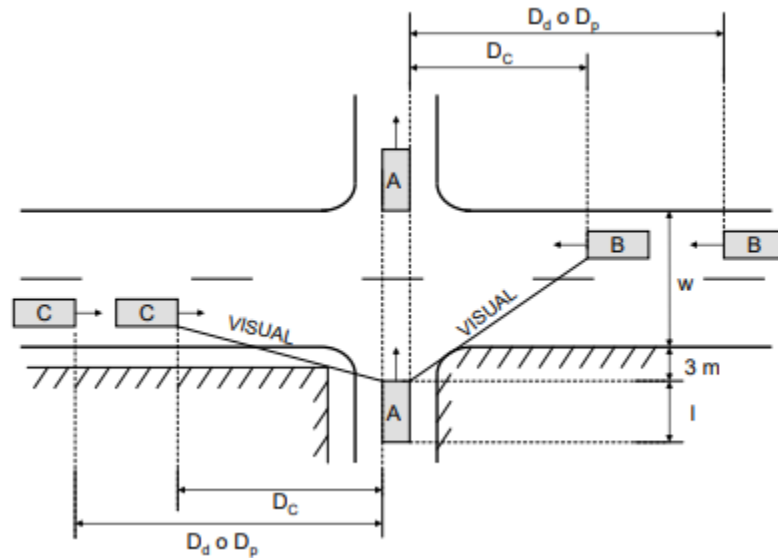


Figura 7-6- Visibilidad de cruce. Fuente: [93]

Como se puede observar, las distancias y las visibilidades se miden de diferente forma. El cálculo de las distancias es analítico, dependiendo de la velocidad, tiempo... mientras que la visibilidad es variable y depende de la vegetación existente, edificaciones y, en general, obstáculos que reduzcan el campo de visión del conductor.

El objetivo del desarrollo de este algoritmo se basa en permitir al usuario conocer la distancia a la que se encuentra un objeto. La aplicación práctica sería el control de la distancia de visibilidad del usuario, la cual se puede ver reducida por la presencia de vegetación en los contornos exteriores de la plataforma, equipamiento de la carretera, cambios de rasante o condiciones climáticas, entre otros.

De este punto surgen dos alternativas que se consideran interesantes. Por un lado, existe la opción de permitir al usuario medir la distancia a la que se encuentra un objeto determinado y por otro, realizar mediciones automáticas que tengan en cuenta la posición de los obstáculos. Respecto a la primera opción, sería útil para medir visibilidad de cruce y de decisión ya que estas distancias recogen direcciones aleatorias que dependen de la situación en la que se encuentre el usuario y, por tanto, sería difícil regularlas. En cuanto a la segunda opción, sería útil para medir visibilidad de parada y de adelantamiento.

En primer lugar, se desarrolla el algoritmo que permite al usuario conocer la distancia a la que se encuentra el objeto en el cual esté interesado. Este algoritmo será desarrollado mientras la escena se encuentre en primera persona.

El diagrama de flujo que se plantea para el desarrollo de esta herramienta es el siguiente.

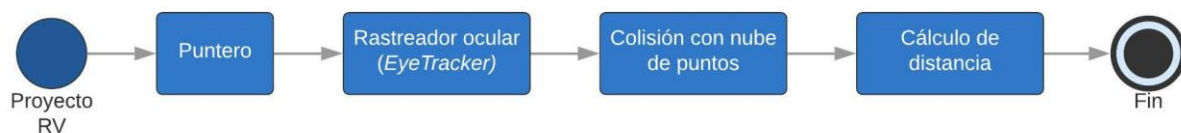


Figura 7-7- Diagrama de flujo. Cálculo de distancias a objetos.

Comenzando con el primer bloque, se considera necesario colocar un puntero para distinguir con claridad y señalar con precisión el objeto al que se está apuntando. Para ello, bastaría con colocar una marca en el centro de la escena mientras se encuentra en primera persona.

Luego, se generaría un rastreador ocular que permita identificar hacia dónde enfoca el usuario su atención, en este caso, con el desplazamiento del puntero. Usando el origen y la dirección de la mirada se genera un vector.

Con el objetivo de encontrar el segundo punto que defina la longitud del vector, se impone que dicho vector

colisione con la malla compleja⁴ de la nube de puntos.



Figura 7-8- Ejemplo de malla simple (izquierda) y compleja (derecha)

Por último, una vez definido el inicio y el fin del vector, se calcula la distancia a dicho objeto pudiendo obtener así la distancia de visibilidad.

De acuerdo con [94], esta aplicación se puede desarrollar para equipos más potentes como las HoloLens. En este caso, con el rastreador ocular se pretende identificar la dirección de la propia mirada del usuario para así determinar la dirección del vector. También propone utilizar la rotación de la cabeza. Como se puede observar, estos resultados se pueden conseguir mediante el empleo de equipos de alta tecnología y con un gran equipamiento, los cuales permiten extraer el mejor resultado a la Realidad Virtual.

En segundo lugar, se desarrolla el algoritmo que permite medir distancias a obstáculos sin necesidad de que el usuario decida cuál es el obstáculo. Dado que el objetivo de este algoritmo es calcular la visibilidad de parada y de adelantamiento, se calcula la distancia entre los vehículos presentes en la escena. En la siguiente figura se muestra el diagrama de flujo propuesto.

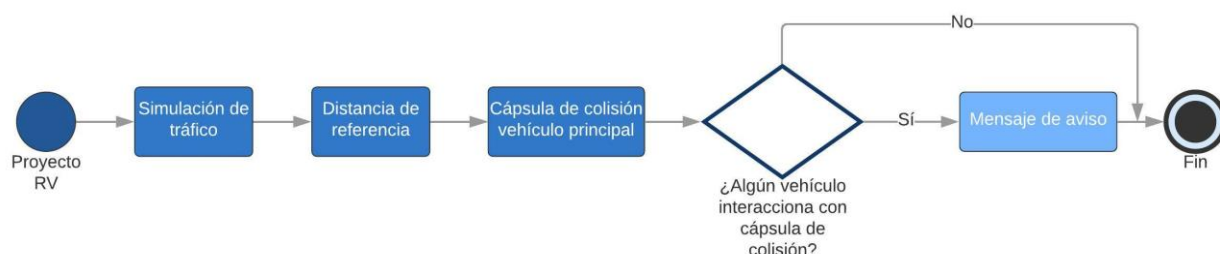


Figura 7-9- Diagrama de flujo. Cálculo de distancia entre vehículos.

Desarrollando con más detalle este diagrama de flujo, el primer paso necesario sería realizar una simulación del tráfico para así poder estudiar las distancias de visibilidad en una situación próxima a la realidad y poder comprobar cuáles serían las condiciones de visibilidad en cada caso. Esto permitiría darle un enfoque práctico al cálculo analítico que supone la determinación de las distancias de parada y adelantamiento.

Estas distancias, calculadas analíticamente, serían las distancias de referencia medidas a partir del vehículo principal. El objetivo buscado con la determinación de estas distancias es saber cuándo un vehículo entra en esta zona de seguridad del vehículo principal y estudiar así dicha situación para conocer el nivel de seguridad. Conociendo el funcionamiento de *Unreal Engine*, la zona de seguridad alrededor del vehículo principal se definiría con una cápsula de colisión cuyo ámbito correspondiera a una distancia igual a la distancia de referencia. Dado que se tienen dos distancias de referencia (parada y adelantamiento), se crearían dos cápsulas de colisión, una para la distancia de parada y otra para la distancia de adelantamiento.

⁴ Unreal Engine ofrece la opción de trabajar con dos mallas, una malla simple determinada por la envolvente del objeto (consume menos recursos) y una compleja, definida con mayor precisión.

Al entrar un vehículo en dicha zona, el software detecta su presencia y lo muestra a través de un mensaje de aviso en la pantalla. En el caso de que no exista ningún vehículo en el interior de esta región, no se daría ningún aviso, indicándose así que las condiciones de adelantamiento o parada son seguras.

Además, atendiendo a las definiciones de visibilidad de parada y adelantamiento, resulta imprescindible determinar si el vehículo que ha entrado en la zona se encuentra dentro del campo de visión del vehículo principal. Para ello, se determina la posición del vehículo que ha entrado en la zona a través de sus propiedades. Conociendo dicha posición, se lanza un rayo de forma similar a como se ha indicado en el primer algoritmo de este apartado, pero en este caso la posición final ya está determinada y no queda a elección del usuario (es la posición del vehículo que ha entrado en la zona, la cual se ha obtenido a través de sus propiedades). Más tarde, se calcula la longitud del rayo para compararla con la longitud de la línea que une la posición del vehículo principal con la del vehículo que ha entrado en la zona. En caso de que la longitud del rayo sea inferior a la longitud de dicha línea, se concluye que el vehículo que ha entrado en la zona no se encuentra en el campo de visión del vehículo principal.

Analizando este proceso, es importante establecer una clara diferencia entre ambas distancias. La distancia de adelantamiento implica la distancia existente entre el vehículo principal y un vehículo que circula en sentido opuesto mientras que la distancia de parada hace referencia a la distancia existente entre dos vehículos que circulan en el mismo sentido. Por ello, es importante determinar el sentido que tendrá cada vehículo al realizar la simulación del tráfico. Se propone que el sentido creciente venga definido por un valor de 1 mientras que el sentido decreciente tenga un valor de 0 y que estos valores se empleen para distinguir el sentido del tráfico.

7.3 Simulación de tráfico

Una de las grandes aplicaciones que tiene la aplicación de la Realidad Virtual en el sector AEC es la simulación de un entorno real accesible desde la oficina, sin necesidad de desplazarse a un emplazamiento concreto.

Dentro del ámbito de los proyectos de carreteras o análisis de tramos de carreteras en explotación, esta visión realista se ofrece con la adición de la señalización tanto vertical como horizontal, la vegetación, otros obstáculos que puedan aparecer, la modificación de las condiciones climáticas, así como la posición de sol y, por supuesto, con la simulación de tráfico.

Es por ello por lo que se propone el desarrollo de un algoritmo que permita realizar una simulación de tráfico con el que se puedan simular diferentes niveles de servicio, trayectorias de vehículos... El objetivo principal que se busca con este desarrollo es permitir a un administrador de la infraestructura “estar presente” en diferentes situaciones aleatorias para así analizar cuáles son las condiciones de seguridad. En el caso de tramos en explotación donde se tenga información sobre aforos, como es el caso del tramo de estudio, se permitiría estudiar dicho nivel de servicio correspondiente a un estado próximo al real.

En la siguiente figura se muestra una propuesta del diagrama de flujo para el desarrollo de este algoritmo.

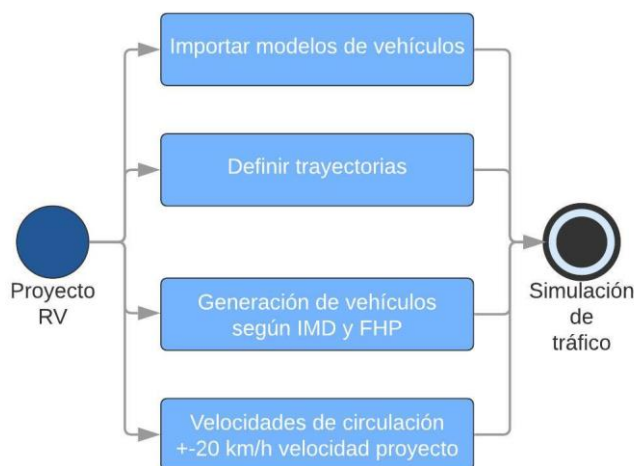


Figura 7-10- Diagrama de flujo. Simulación del tráfico.

Para la simulación del tráfico, se necesita el desarrollo simultáneo de varias acciones. En primer lugar, para dotar de realismo al modelo, se requiere la importación de diferentes vehículos, tanto ligeros (turismos, furgonetas, motocicletas...) como pesados (autobuses, camiones...). De cara a poder identificarlos en el algoritmo, cada tipo de vehículo tendrá un código asociado.

Por otra parte, se deben definir previamente las trayectorias que van a seguir dichos vehículos. Dado que se conoce el trazado de la carretera, se puede definir la trayectoria de cada vehículo perfectamente. Sin embargo, puede ocurrir que algún tipo de vehículo no pueda seguir una trayectoria concreta por restricciones geométricas. Por ello, es necesario codificar también las trayectorias para así asociarla a un vehículo que pueda llevarla a cabo.

En la simulación del tráfico, un punto fundamental es la definición del volumen de tráfico que va a circular por el tramo de estudio. De esta manera, se propone controlar este volumen a partir de la definición de una IMD. Para el reparto de dicho volumen de vehículos, se propone el desarrollo de gráficos que consideren el factor de hora punta (FHP) con el objetivo de evitar que la generación de vehículos sea lineal en el tiempo y seguir una distribución realista. En función de la hora a la que se quiera realizar la simulación y el valor de la IMD, se añaden vehículos al modelo.

Por último, se asignan diferentes velocidades de circulación a cada vehículo. En este caso, se propone que sean velocidades aleatorias comprendidas en un rango de ± 20 km/h la velocidad de proyecto.

Una vez definidos estos parámetros, se desarrolla la simulación del tráfico combinando aleatoriamente tipos de vehículos, trayectorias y velocidades de circulación compatibles, con una frecuencia determinada por la IMD y el factor de hora punta (FHP)⁵.

7.4 Interacción con la señalización vertical

En principal mecanismo que tienen los administradores de las infraestructuras para regular la circulación y establecer un nivel de seguridad adecuado en la misma es la señalización horizontal y vertical. De acuerdo con la norma 8.1 IC, [95], la señalización persigue cuatro objetivos fundamentales:

- Aumentar la seguridad de la circulación.
- Aumentar la eficacia de la circulación.
- Aumentar la comodidad de la circulación.
- Facilitar la orientación de los conductores.

En cuanto a la señalización vertical, existen numerosos tipos que se organizan en tres categorías: advertencia de peligro, reglamentación e indicación, [95]. Dentro de la categoría de reglamentación, la señalización correspondiente a la limitación de velocidad juega un papel fundamental a la hora de asegurar la seguridad de un tramo pues establece cuál es la velocidad límite de circulación que permite a todos los vehículos que tienen acceso a dicho tramo circular con seguridad.

Por ello, se desarrolla en este apartado un algoritmo que permita al vehículo principal conocer cuál es el límite de velocidad de circulación en el tramo donde se encuentra. Además, con esta herramienta el usuario podrá experimentar diferentes niveles de seguridad en el tramo pues se podría modificar dicha limitación, reduciendo o aumentando la velocidad máxima de circulación según interese.

A continuación, se muestra el diagrama de flujo propuesto para el desarrollo del algoritmo.

⁵ En [93] se desarrolla un ejemplo de generación de obstáculos con trayectorias.

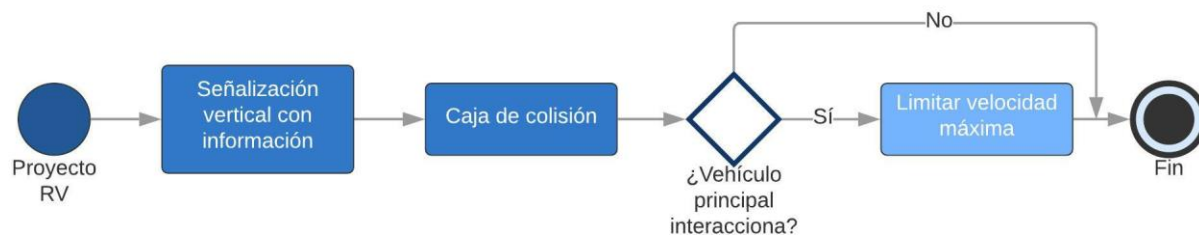


Figura 7-11- Diagrama de flujo. Interacción con señalización vertical.

En primer lugar, como se señala en el diagrama de flujo, es importante que la señalización esté acompañada de información referente al mensaje que se quiere transmitir. En el caso de señalización vertical de limitación de velocidad, sería imprescindible para el desarrollo de este algoritmo disponer de la información correspondiente a la limitación de velocidad que impone, así como conocer el tramo en el que se aplica esta restricción.

Una vez se conoce esta información, se define una caja de colisión asociada al tramo en el que se aplica la limitación de velocidad que establece la señalización. Con ello, cuando el vehículo principal entre en esta zona, su velocidad máxima se verá limitada al valor que establece la señalización, salvo en carreteras convencionales, excepto travesías, donde la velocidad podrá ser rebasada en 20 km/h por turismos y motocicletas para adelantar a otros vehículos, de acuerdo con las normas de circulación. En el caso de que el vehículo no interaccione con otro tramo de velocidad máxima diferente, ésta no se modificará.

Este algoritmo permitirá a los administradores de infraestructuras determinar el nivel de seguridad presente en cada tramo para así tomar las medidas adecuadas y asegurar su correcto funcionamiento.

8 CONCLUSIONES Y LÍNEAS DE TRABAJO

Engineering is the art of directing the great sources of power in nature for the use and convenience of man.

-Thomas Tredgold-

En el presente apartado, se exponen las principales conclusiones extraídas tras la realización del TFM junto con las líneas de trabajo propuestas para futuros estudios debido a su gran interés dentro del sector AEC.

8.1 Conclusiones

Tras la finalización del caso práctico donde se lleva a un escenario real la tecnología desarrollada en el presente TFM, se exponen las principales conclusiones extraídas. Principalmente, las conclusiones se pueden organizar en dos temáticas: nube de puntos y realidad virtual. Siguiendo el mismo orden con el que se ha avanzado en este trabajo, en primer lugar, se comentan las diferentes casuísticas encontradas al inicio del trabajo para obtener el instrumento de partida, la nube de puntos. Más tarde, se exponen las conclusiones principales sobre el uso de RPA y/o escáner láser para el levantamiento topográfico mediante nube de puntos. Luego, se hablará sobre la tecnología de RV, AR y MR y la gran utilidad de la RV en el sector AEC. Para finalizar, se muestran las conclusiones obtenidas durante el desarrollo del caso práctico.

En primer lugar, se señala la necesidad de conocimiento, investigación e inversión que requiere el levantamiento topográfico mediante nube de puntos a través de un escáner láser. Estos equipos tienen un precio elevado y requieren del empleo de softwares específicos desarrollados por cada fabricante. Si bien el resultado obtenido por estas herramientas es de gran calidad en un tiempo reducido, es muy importante tener en cuenta dicha inversión y contar con personal experimentado. El consejo por parte de profesionales experimentados en este campo ha sido de especial importancia para el desarrollo del presente TFM y establecer objetivos.

Por otra parte, el trabajo con una nube de puntos puede resultar sencillo a priori ya que el material producido tiene una gran calidad gráfica y visual, lo cual simplifica su tratamiento. Sin embargo, la mayor inversión de trabajo dentro de este flujo por el cual se llega a la nube de puntos se desarrolla en las fases iniciales. Son las fases de definición de parámetros de proyectos, visitas a campo, planificación de estacionamientos las que requieren mayor trabajo para poder obtener un resultado final adecuado.

Al trabajar con nube de puntos, el gran volumen de información recogido hace que existan numerosas aplicaciones entre las que destacan el desarrollo de modelos *As-built*, siendo de gran utilidad para administradores de infraestructuras.

A pesar de que en el presente TFM no se ha trabajado con RPA, se han desarrollado pruebas empleando la técnica de la fotogrametría. Con estos ensayos se ha llegado a la conclusión de que la fotogrametría es una

técnica ampliamente desarrollada en la actualidad y con gran utilidad de cara a la generación de nubes de puntos. Sin embargo, el uso de RPA requiere de ciertas licencias y requisitos, a la vez de la realización de un plan de vuelo. Por tanto, vuelve a ser especialmente importante la formación y la experiencia en su uso y el desarrollo de un gran volumen de trabajo previo para estudiar la zona de interés y generar el plan de vuelo.

En cuanto a las tecnologías de RV, AR y MR se ha llegado a la conclusión de que han llegado para quedarse y hacer el trabajo técnico más humano, intuitivo y eficiente, permitiendo llegar a un campo de visión que sin ellas es complicado alcanzar: el del ciudadano. El objetivo final de un proyecto de carácter público es poder satisfacer las necesidades del ciudadano y, por ello, este punto de vista es fundamental. Con un proyecto 2D o 3D es imposible percibir las proporciones o el tamaño de forma realista mientras que, con un modelo de realidad virtual, todo ello se vuelve alcanzable.

Analizando con más detalle la RV, elegida como tecnología para el desarrollo del presente TFM, se deduce que esta tecnología es capaz de agregar un gran valor al sector AEC. Tanto en proyectos en fase de desarrollo como en fase de explotación, la Realidad Virtual ofrece numerosas aplicaciones. En este caso, el trabajo se ha enfocado en la fase de explotación de una infraestructura y, como se ha demostrado, permite realizar análisis del estado actual con un nivel de detalle elevado, simular diferentes hipótesis para mejorarlo, simular el efecto que tendrían actuaciones futuras (por ejemplo, una variante del trazado), recorridos virtuales... En cuanto a un proyecto en fase de desarrollo, la aplicación de Realidad Virtual ofrecería un nuevo punto de vista a la hora de tomar decisiones, nuevos métodos para mostrar el trabajo desarrollado, recorridos virtuales para realizar comprobaciones... facilitando al ponente la inmersión en el proyecto por parte de sus oyentes.

En definitiva, la tecnología de nube de puntos y Realidad Virtual están cada vez más presentes en el sector AEC. De hecho, se están desarrollando actualmente proyectos de investigación que combinan dichas tecnologías como es el caso del proyecto PANDORA con el cual se han reunido las empresas SACYR, ATyges y Aplitop. Tres características acreditan su capacidad y éxito: permitir el desarrollo de un sistema de navegación autónomo; hacer posible el desarrollo de una plataforma multisensorial de escaneo en movimiento e imagen de alta resolución y, por último, permitir el desarrollo de aplicaciones software basadas en realidad virtual y realidad aumentada [38].

8.2 Líneas de trabajo

Tras la consulta de numerosas fuentes de información, la revisión bibliográfica llevada a cabo en la base de datos *Web of Science* y el análisis del estudio realizado, se han identificado unas líneas de investigación que serían muy interesantes de cara al desarrollo de futuros TFM. A continuación, se exponen estas líneas de investigación.

En primer lugar, tras la revisión de numerosos artículos publicados en los últimos años, se observa una importante tendencia hacia la investigación sobre la identificación y creación de objetos automáticamente a partir de la nube de puntos. Por tanto, actualmente el estudio se enfoca hacia la reducción del trabajo manual llevado a cabo por el usuario ya que, además de necesitar un volumen de tiempo considerable, es probable que se generen más errores. Hoy en día, existen compañías como *ClearEdge3D* [96] que desarrollan herramientas a través de algoritmos de inteligencia artificial, las cuales son capaces de generar tuberías a partir de una nube de puntos, por ejemplo. Según la propia empresa, se puede reducir el trabajo manual de generación de un modelo *As-built*, en condiciones favorables, hasta en un 70 %. Es por ello por lo que se considera *el desarrollo de herramientas para la automatización de procesos a partir de una nube de puntos* una interesante línea de investigación.

Con el desarrollo del presente trabajo, se ha llegado a la conclusión de que el flujo de trabajo Nube de puntos – Modelo BIM – Realidad Virtual potenciaría en gran medida el entorno virtual obtenido finalmente. La combinación de tener una gran cantidad de información en el modelo BIM, fácil de consultar, con la capacidad de ver dicho modelo en primera persona en el entorno virtual simplificaría tareas de análisis y comprobación al realizar la *inmersión* en el modelo BIM. Por ello, sería interesante completar el entorno virtual desarrollado en el presente TFM con la incorporación del modelo BIM del mismo tramo de estudio en el que se incluyan aspectos como la señalización vertical.

En cuanto a la Realidad Virtual, se propone la adaptación del entorno generado para su inmersión mediante equipos de gafas de realidad virtual, estudiando su utilidad, ventajas e inconvenientes, capacidad técnica... Este estudio serviría, por ejemplo, para comparar el alcance de un equipo *low-cost* como *Google Cardboard* con el

de un equipo más potente como las *Oculus Quest 2*. Además, esta línea de investigación incluiría implícitamente el estudio de la exportación del entorno virtual a otras plataformas para poder ser visionado a través de un smartphone (requerido para el uso de *Google Cardboard*).

En cuanto al desarrollo del caso práctico, se han identificado varias líneas de investigación. En primer lugar, se propone investigar sobre la automatización del proceso de generación de superficies a partir de la nube de puntos. A través de la programación en *Dynamo* conectado con *Civil3D*, se llevaría a cabo la creación de superficies correspondientes a cada región de la carretera (calzada, arcén, mediana, cuneta) para reducir el tiempo empleado en este proceso.

Por último, en cuanto al análisis de seguridad vial mediante realidad virtual, se propone la realización del estudio cuantitativo de distancia y visibilidad de parada, de adelantamiento, de decisión y de cruce mediante el desarrollo de las herramientas propuestas en el apartado *Propuesta de herramienta RV-SegVial*.

9 REFERENCIAS

- [1] F. Javier, “Comparativa entre software propietario y Superior de levantamientos Ingeniería libre en fotogramétricos con RPAs,” 2020.
- [2] M. G. Dominguez, “De nube de puntos a BIM. Caso práctico: Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, Braunschweig,” 2020.
- [3] A. Marfil Cita, “Detección de la línea de costa gaditana mediante datos de imágenes satélite SAR y LiDAR,” 2020.
- [4] D. Seda and C. T. Lozano, “Inspección de puentes con infrarrojos,” 2016.
- [5] M. López Menárguez, “Entorno 3D en Unreal Engine 4,” 2018.
- [6] M. Ojanguren and M. C. Hernández, “Realidad virtual en la ingeniería civil. Virtualización de una obra,” 2016.
- [7] M. Á. Guillén Belmonte and D. Ojados González, “Realidad virtual para la mejora de los planes de autoprotección. Recorrido virtual en el edificio Casa del Estudiante de la UPCT,” 2020.
- [8] C. Lorenzo, “REALIDAD VIRTUAL APLICADA A LA INGENIERÍA CIVIL. ESTUDIO DE APLICACIÓN DE SISTEMAS DE VISUALIZACIÓN Y ANOTACIÓN INTERACTIVA EN INFRAESTRUCTURAS CIVILES,” 2017, [Online]. Available: [https://riull.ull.es/xmlui/bitstream/handle/915/7003/Realidad virtual aplicada a la ingenieria civil. Estudio de aplicacion de sistemas de visualizacion y anotacion interactiva en infraestructuras civiles.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://riull.ull.es/xmlui/bitstream/handle/915/7003/Realidad%20virtual%20aplicada%20a%20la%20ingenieria%20civil.%20Estudio%20de%20aplicacion%20de%20sistemas%20de%20visualizacion%20y%20anotacion%20interactiva%20en%20infraestructuras%20civiles.pdf?sequence=1&isAllowed=y).
- [9] A. Pérez Rodríguez, “Anotaciones de diseño en modelos BIM mediante entornos web, dispositivos móviles y realidad virtual,” 2017.
- [10] O. E. Apolo Apolo, ““Recuperación, modelado y recreación utilizando fotogrametría, del Patrimonio Oleícola Industrial de la Hacienda de Quinto,”” vol. 1, p. 104, 2016, [Online]. Available: <https://idus.us.es/xmlui/handle/11441/58027>.
- [11] G. Carapellese, J. C. García de Paredes, J. J. Martín-del-Río, A. Graciani-García, and E. Cabrera-Revuelta, “Evaluación de fortificaciones rurales de tapia mediante técnica SfM de fotogrametría digital. Aplicación metodológica al Castillo de Alhonoiz (Écija, España),” *Estoa*, vol. 9, no. 18, pp. 101–113, 2020, doi: 10.18537/est.v009.n018.a09.
- [12] E. Cabrera Revuelta and B. Molero Alonso, “Closrange photogrammetry. Previous works to the data collection,” *EGE-Expresión Gráfica en la Edif.*, pp. 33–44, 2016, doi: 10.4995/ege.2016.12458.
- [13] J. E. Nieto, J. J. Moyano, and P. Fernández-Valderrama, “Implementación de las nuevas técnicas de levantamiento en el sistema BIM (Building Information Modeling),” *XII Graph. Expr. Appl. to Build. Int. Conf. (APEGA 2014)*, pp. 104–113, 2014.
- [14] F. R. Delgado, “A novel approach to the management of point clouds derived from scanning and photogrammetry for the optimisation of printable 3D formats [Un nuevo enfoque en la gestión de nubes de...,” no. December, 2016.
- [15] J. Herráez Boquera, J. L. Denia Ríos, E. M. García García, and P. Navarro Esteve, “Aplicaciones del Láser Scanner a la ingeniería civil,” no. 1, p. 38, 2012.
- [16] R. Tomás, A. Riquelme, M. Cano, and A. Abellán, “Structure from Motion (SfM): una técnica fotogramétrica de bajo coste para la caracterización y monitoreo de macizos rocosos,” *10ª Simp. Nac. Ing. Geotécnica, A Coruña, España*, vol. 1, no. 1, pp. 209–216, 2016.

- [17] GSA, "GSA Building Information Modeling Guide Series: 03 – GSA BIM Guide for 3D Imaging," *Imaging*, no. January, 2009.
- [18] L. Sanhudo *et al.*, "A framework for in-situ geometric data acquisition using laser scanning for BIM modelling," *J. Build. Eng.*, vol. 28, no. August 2019, 2020, doi: 10.1016/j.jobbe.2019.101073.
- [19] M. Weinmann, *Reconstruction and Analysis of 3D Scenes*. 2016.
- [20] D. Costantino, M. Pepe, and A. G. Restuccia, "Scan-to-HBIM for conservation and preservation of Cultural Heritage building: the case study of San Nicola in Montedoro church (Italy)," *Appl. Geomatics*, no. 2019, 2021, doi: 10.1007/s12518-021-00359-2.
- [21] Y. Pan and L. Zhang, "Roles of artificial intelligence in construction engineering and management: A critical review and future trends," *Autom. Constr.*, vol. 122, no. November 2020, p. 103517, 2021, doi: 10.1016/j.autcon.2020.103517.
- [22] S. Pu and G. Vosselman, "Knowledge based reconstruction of building models from terrestrial laser scanning data," *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, vol. 64, no. 6, pp. 575–584, 2009, doi: 10.1016/j.isprsjprs.2009.04.001.
- [23] B. Pradhan and M. I. Sameen, *Laser Scanning Systems in Highway and Safety Assessment Analysis of Highway Geometry and Safety Using LiDAR*. 2020.
- [24] L. Notes, *Advances in 3D Geoinformation Systems*. 2008.
- [25] Q. Wang and M. K. Kim, "Applications of 3D point cloud data in the construction industry: A fifteen-year review from 2004 to 2018," *Adv. Eng. Informatics*, vol. 39, no. September 2018, pp. 306–319, 2019, doi: 10.1016/j.aei.2019.02.007.
- [26] T. Mill, A. Alt, and R. Liias, "Combined 3D building surveying techniques-Terrestrial laser scanning (TLS) and total station surveying for BIM data management purposes," *J. Civ. Eng. Manag.*, vol. 19, no. SUPPL.1, pp. 23–32, 2013, doi: 10.3846/13923730.2013.795187.
- [27] P. Tang, D. Huber, B. Akinci, R. Lipman, and A. Lytle, "Automatic reconstruction of as-built building information models from laser-scanned point clouds: A review of related techniques," *Autom. Constr.*, vol. 19, no. 7, pp. 829–843, 2010, doi: 10.1016/j.autcon.2010.06.007.
- [28] M. Gregor and A. Tibaut, *Ontology based information creation approach for digital twins: Early-stage findings*, vol. 853. Springer International Publishing, 2020.
- [29] M. Pepe, D. Costantino, and A. R. Garofalo, "An efficient pipeline to obtain 3D model for HBIM and structural analysis purposes from 3D point clouds," *Appl. Sci.*, vol. 10, no. 4, 2020, doi: 10.3390/app10041235.
- [30] L. Barazzetti, R. Brumana, S. Della Torre, G. Gusmeroli, and G. Schiantarelli, "Point clouds turned into finite elements: The umbrella vault of Castel Masegra," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 364, no. 1, 2018, doi: 10.1088/1757-899X/364/1/012087.
- [31] J. Corso Sarmiento, A. Marco Bercero, J. Casals Fernandez, and P. Garcia-Almirall, "SCAN to BIM beyond a Final BIM: Why, When and How," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 603, no. 4, 2019, doi: 10.1088/1757-899X/603/4/042090.
- [32] M. K. Masood, A. Aikala, O. Seppänen, and V. Singh, "Multi-Building Extraction and Alignment for As-Built Point Clouds: A Case Study With Crane Cameras," *Front. Built Environ.*, vol. 6, no. December, 2020, doi: 10.3389/fbuil.2020.581295.
- [33] R. Romero-Jarén and J. J. Arranz, "Automatic segmentation and classification of BIM elements from point clouds," *Autom. Constr.*, vol. 124, no. February, 2021, doi: 10.1016/j.autcon.2021.103576.
- [34] X. Zhao, B. Kargoll, M. Omidalizarandi, X. Xu, and H. Alkhatib, "Model selection for parametric surfaces approximating 3d point clouds for deformation analysis," *Remote Sens.*, vol. 10, no. 4, 2018, doi: 10.3390/rs10040634.
- [35] C. Cabo, C. Ordoñez, S. García-Cortés, and J. Martínez, "An algorithm for automatic detection of pole-like street furniture objects from Mobile Laser Scanner point clouds," *ISPRS J. Photogramm. Remote*

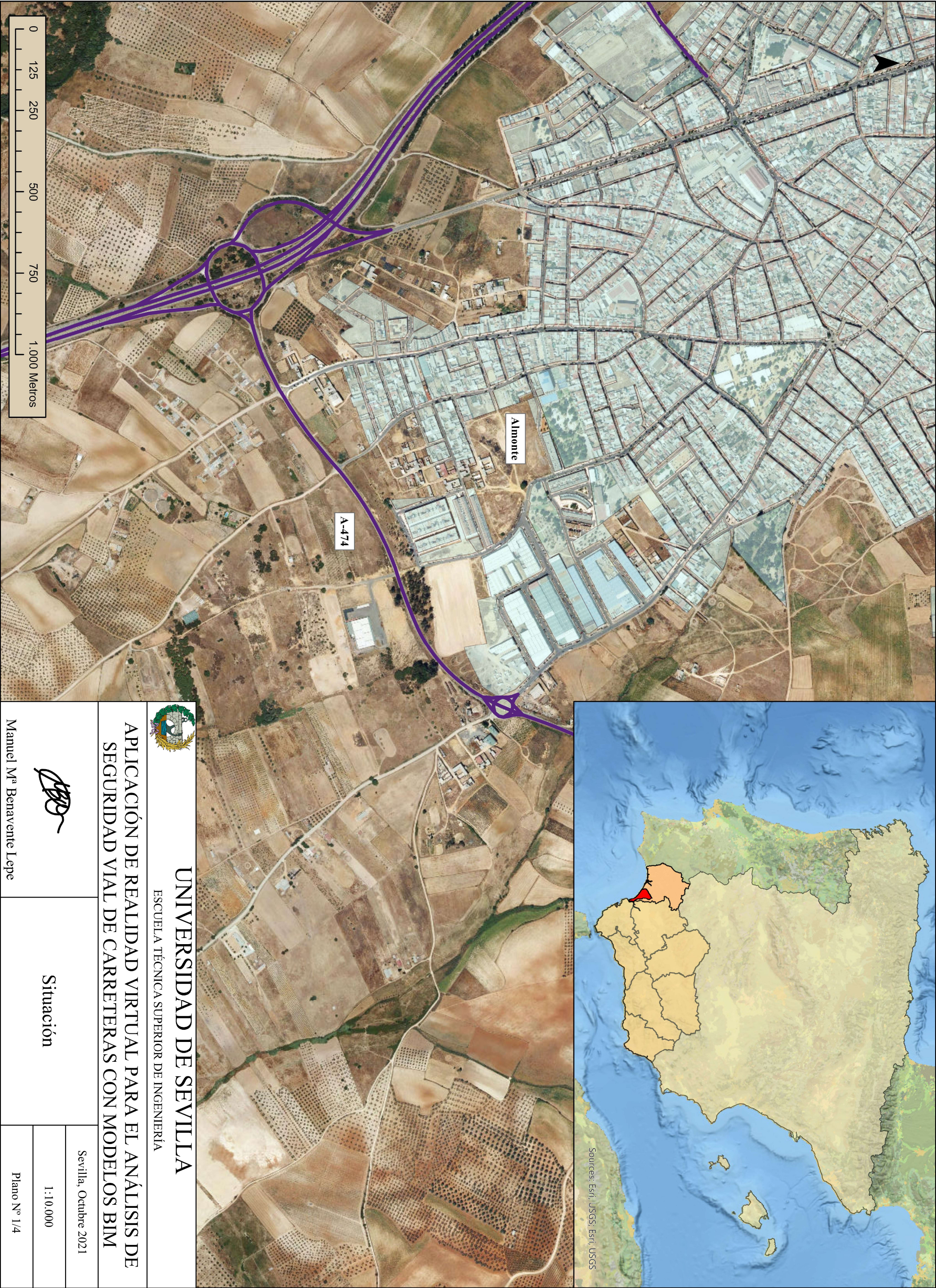
- Sens.*, vol. 87, pp. 47–56, 2014, doi: 10.1016/j.isprsjprs.2013.10.008.
- [36] Z. Wu, L. Wang, Z. Fu, L. Zhu, F. Dou, and P. Xu, “VR+BIM: Perception and Design Optimization of Highway,” *Proc. - 8th Int. Conf. Virtual Real. Vis. ICVRV 2018*, pp. 164–165, 2018, doi: 10.1109/ICVRV.2018.00059.
 - [37] H. Bahri, D. Krcmarik, R. Moezzi, and J. Kočí, “Efficient Use of Mixed Reality for BIM system using Microsoft HoloLens,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 52, no. 27, pp. 235–239, 2019, doi: 10.1016/j.ifacol.2019.12.762.
 - [38] Sacyr, “El proyecto Pandora y la innovación ‘como forma de afrontar la vida.’” <https://www.sacyr.com/-/el-proyecto-pandora-y-la-innovacion-como-forma-de-afrontar-la-vida-> (accessed Oct. 30, 2021).
 - [39] C. De Santos-Berbel and M. Castro, “Three-Dimensional Virtual Highway Model for Sight-Distance Evaluation of Highway Underpasses,” *J. Surv. Eng.*, vol. 144, no. 4, p. 05018003, 2018, doi: 10.1061/(asce)su.1943-5428.0000258.
 - [40] G. Caroti and A. Piemonte, “Measurement of cross-slope of roads: Evaluations, algorithms and accuracy analysis,” *Surv. Rev.*, vol. 42, no. 315, pp. 92–104, 2010, doi: 10.1179/003962610X12572516251484.
 - [41] K. González-Gómez, L. Iglesias, R. Rodríguez-Solano, and M. Castro, “Framework for 3D point cloud modelling aimed at road sight distance estimations,” *Remote Sens.*, vol. 11, no. 23, pp. 1–14, 2019, doi: 10.3390/rs11232730.
 - [42] M. Castro and C. De Santos-Berbel, “Spatial analysis of geometric design consistency and roadsid distance,” 2014.
 - [43] M. Castro, J. A. Anta, L. Iglesias, and J. A. Sánchez, “GIS-Based System for Sight Distance Analysis of Highways,” *J. Comput. Civ. Eng.*, vol. 28, no. 3, 2014, [Online]. Available: [https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)CP.1943-5487.0000317](https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000317).
 - [44] M. Castro, L. Iglesias, J. A. Sánchez, and L. Ambrosio, “Sight distance analysis of highways using GIS tools,” *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.*, vol. 19, no. 6, pp. 997–1005, 2011, doi: 10.1016/j.trc.2011.05.012.
 - [45] J. Gong, H. Zhou, C. Gordon, and M. Jalayer, “Mobile terrestrial laser scanning for highway inventory data collection,” *Congr. Comput. Civ. Eng. Proc.*, no. January 2015, pp. 545–552, 2012, doi: 10.1061/9780784412343.0069.
 - [46] I. Abuhadrous, S. Ammoun, F. Nashashibi, F. Goulette, and C. Lurgeau, “Digitizing and 3D modeling of urban environments and roads using vehicle-borne laser scanner system,” *2004 IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robot. Syst.*, vol. 1, pp. 76–81, 2004, doi: 10.1109/iros.2004.1389332.
 - [47] A. Boyko and T. Funkhouser, “Extracting roads from dense point clouds in large scale urban environment,” *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, vol. 66, no. 6 SUPPL., pp. S2–S12, 2011, doi: 10.1016/j.isprsjprs.2011.09.009.
 - [48] S. I. El-Halawany and D. D. Lichti, “Detection of Road Poles from Mobile Terrestrial Laser Scanner Point Cloud,” *Int. Work. Multi-Platform/Multi-Sensor Remote Sens. Mapp.*, 2011, [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5697364>.
 - [49] S. I. El-Halawany and D. D. Lichti, “Detecting road poles from mobile terrestrial laser scanning data,” *GIScience Remote Sens.*, vol. 50, no. 6, pp. 704–722, 2013, [Online]. Available: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/15481603.2013.866815>.
 - [50] H. Fan, W. Yao, and L. Tang, “Identifying man-made objects along urban road corridors from mobile lidar data,” *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.*, vol. 11, no. 5, pp. 950–954, 2014, doi: 10.1109/LGRS.2013.2283090.
 - [51] H. Guan, J. Li, Y. Yu, Z. Ji, and C. Wang, “Using Mobile LiDAR Data for Rapidly Updating Road Markings,” *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 16, no. 5, pp. 2457–2466, 2015, doi: 10.1109/TITS.2015.2409192.
 - [52] J. Landa and D. Prochazka, “Automatic Road Inventory Using LiDAR,” *Procedia Econ. Financ.*, vol. 12, no. March, pp. 363–370, 2014, doi: 10.1016/s2212-5671(14)00356-6.



- [53] P. Kumar, C. P. McElhinney, P. Lewis, and T. McCarthy, “An automated algorithm for extracting road edges from terrestrial mobile LiDAR data,” *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, vol. 85, no. 2013, pp. 44–55, 2013, doi: 10.1016/j.isprsjprs.2013.08.003.
- [54] H. Wang *et al.*, “Automatic road extraction from mobile laser scanning data,” *Proc. Int. Conf. Comput. Vis. Remote Sensing, CVRS 2012*, no. December, pp. 136–139, 2012, doi: 10.1109/CVRS.2012.6421248.
- [55] B. Yang, Z. Wei, Q. Li, and J. Li, “Automated extraction of street-scene objects from mobile lidar point clouds,” *Int. J. Remote Sens.*, vol. 33, no. 18, pp. 5839–5861, 2012, doi: 10.1080/01431161.2012.674229.
- [56] Dji, “Phantom 3 Standard.” <https://www.dji.com/es/phantom-3-standard> (accessed Mar. 11, 2021).
- [57] A. Insights, “Lidar vs fotogrametría: ¿qué tecnología es mejor?” <https://www.aerial-insights.co/blog/lidar-vs-fotogrametria/> (accessed Oct. 19, 2021).
- [58] P. Nacional, “Fotogrametría ¿ Qué es la fotogrametría ?,” pp. 1–4.
- [59] ENAIRE, “Mapa de limitaciones por motivos de espacio aéreo.” <https://drones.enaire.es/> (accessed Oct. 27, 2021).
- [60] BIMnD, “Guía rápida para quitarte el miedo a trabajar con Nubes de Puntos 3D.” <https://www.bimnd.es/trabajar-con-nubes-de-puntos-miedo-fuera/> (accessed Sep. 08, 2021).
- [61] Autodesk, “About Scan and Photogrammetry Files and Projects.” https://help.autodesk.com/view/RECAP/ENU/?guid=Reality_Capture_Getting_Started_About_Scan_and_Photogrammetry_Files_and_Projects_html&v=2019 (accessed Sep. 09, 2021).
- [62] F. Scene, “FARO ® SCENE Software El software más intuitivo y eficiente para el procesamiento y registro de datos de escaneo,” pp. 1–2, 2021.
- [63] Leica, “Software de procesamiento de nubes de puntos 3D Leica Cyclone.” <https://leica-geosystems.com/es-es/products/laser-scanners/software/leica-cyclone> (accessed Sep. 09, 2021).
- [64] L. Geosystems, “Leica BLK360.” https://www.instop.shop/es/inicio/76-leica-blk360.html?gclid=Cj0KCQjw18WKBhCUARIsAFiW7JxmYn8cWoBco5MioSoxk7XY88-YyRKck3-Mtf3vqeELms3iaQCZmnEaAuO1EALw_wcB (accessed Sep. 27, 2021).
- [65] Leica Geosystems, “Leica Cyclone 9.1 Technical Specifications,” no. June, 2016, [Online]. Available: http://www.leica-geosystems.us/downloads123/hds/hds/cyclone/brochures-datasheet/Cyclone_Technical_Specification_en.pdf.
- [66] Autodesk, “ReCap.” <https://www.autodesk.es/products/recap/overview> (accessed Sep. 09, 2021).
- [67] Autodesk, “Novedades de ReCap Pro 2022.” <https://www.autodesk.es/products/recap/features> (accessed Sep. 27, 2021).
- [68] Autodesk, “Supported file formats ReCap Pro.” https://help.autodesk.com/view/RECAP/ENU/?guid=Reality_Capture_Product_Overview_Reality_Capture_Supported_File_Formats_html&v=2019 (accessed Sep. 09, 2021).
- [69] Autodesk, “Scan to mesh with student license.” <https://forums.autodesk.com/t5/installation-licensing/scan-to-mesh-with-student-license/td-p/10284949> (accessed Oct. 19, 2021).
- [70] Autodesk, “Requisitos del sistema de Autodesk ReCap Pro y ReCap Photo.” <https://knowledge.autodesk.com/es/support/recap/learn-explore/caas/sfdcarticles/sfdcarticles/ESP/System-requirements-for-Autodesk-ReCap-Pro-and-ReCap-Photo.html> (accessed Oct. 27, 2021).
- [71] L. Geosystems, “Leica Cyclone IMPORTER 9 . 1 Compatibilidad de formatos con datos escáner láser de otros fabricantes,” pp. 3–4.
- [72] Topotienda, “Escáner láser: qué es, cuales son sus funciones, y qué diferentes tipos hay.” https://topotienda.com/noticias/11_escaner-laser-que-es-cuales-son-sus-funciones (accessed Jun. 29,

- 2021).
- [73] ArcGIS, “¿Qué son los datos LIDAR?” https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/manage-data/las-dataset/what-is-lidar-data-.htm#ESRI_SECTION1_C3F0DD5E4ED24CE185C0B533A8D3A441 (accessed Oct. 27, 2021).
 - [74] DEWESoft, “RECEPTORES GPS / GNSS Y SISTEMAS DE NAVEGACIÓN INERCIAL (INS E IMU).” <https://dewesoft.com/es/productos/interfases-y-sensores/receptores-gps-imu#:~:text=La unidad de medida inercial,mide aceleraciones y velocidades angulares.&text=En un sistema de navegaci3n,en su velocidad y posici3n.> (accessed Oct. 27, 2021).
 - [75] Tecnoceano, “LIDAR Batimetría.” <https://blog.tecnoceano.com/lidar-batimetria/> (accessed Oct. 27, 2021).
 - [76] ArcGIS, “Almacenar datos lidar.” <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/manage-data/las-dataset/storing-lidar-data.htm> (accessed Oct. 27, 2021).
 - [77] S. Imaging, “3D time of flight cameras.” <https://www.stemmer-imaging.com/en-se/knowledge-base/cameras-3d-time-of-flight-cameras/> (accessed Jul. 05, 2021).
 - [78] L. C., “Escáner láser 3D o escáner de luz estructurada: ¿cuál es mejor?,” 2019. <https://www.3dnatives.com/es/escaner-laser-3d-escaner-luz-estructurada-mejor-080820192/#!> (accessed Jul. 05, 2021).
 - [79] Leica Geosystems, “Leica RTC360.” <https://leica-geosystems.com/es-mx/products/laser-scanners/scanners/leica-rtc360> (accessed Mar. 11, 2021).
 - [80] Leica Geosystems, “Leica Pegasus:Two.” https://leica-geosystems.com/es-es/products/mobile-sensor-platforms/capture-platforms/leica-pegasus_two-ultimate (accessed Mar. 11, 2021).
 - [81] R. en Aumento, “Realidad aumentada.” <https://realidadenaumento.es/> (accessed Aug. 17, 2021).
 - [82] N. Bockholt, “Realidad virtual, realidad aumentada, realidad mixta y ¿qué significa ‘inmersión’ realmente?,” *Noboot*, pp. 1–6, 2016.
 - [83] F. Castro, “Estereoscopía.” <http://proyectoidis.org/estereoscopia/> (accessed Aug. 31, 2021).
 - [84] R. en Aumento, “Realidad virtual.” <https://realidadenaumento.es/realidad-virtual/> (accessed Aug. 25, 2021).
 - [85] R. en Aumento, “Diferencia entre realidad aumentada y realidad virtual.” <https://realidadenaumento.es/diferencia-realidad-aumentada-virtual/> (accessed Aug. 26, 2021).
 - [86] Editeca, “Realidad mixta – ¿Qué es y qué oportunidades nos ofrecerá?” <https://editeca.com/realidad-mixta/> (accessed Oct. 23, 2021).
 - [87] Oculus, “Gafas de RV Oculus Quest 2.” https://www.oculus.com/quest-2/?locale=es_ES&utm_source=gg&utm_medium=ps&utm_campaign=11138738123&utm_term=oculusquest2&utm_content=519673404692&utm_ad=107920367263&utm_location=9047035&utm_location2&utm_placement=kwd-563298318914&utm_device=c&utm_match (accessed Apr. 11, 2021).
 - [88] Cardboard, “Google Cardboard.” https://arvr.google.com/intl/es_es/cardboard/ (accessed Oct. 01, 2021).
 - [89] L. Academy, “Las diferencias entre Unity y Unreal.” <https://lboxacademy.es/blog/diferencias-entre-unity-y-unreal/> (accessed Aug. 29, 2021).
 - [90] P. D. E. Huelva, R. Convencional, R. De, R. De Carreteras, R. Convencional, and R. De, “PLAN DE AFOROS DE LA RED AUTONÓMICA DE CARRETERAS DE ANDALUCÍA 2019 Red Autonómica de Carreteras de Andalucía Servicio de Conservación y Dominio Público Viario,” vol. 5588, p. 5588, 2019.
 - [91] IGN, “Centro de descargas.” <http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/index.jsp> (accessed Oct. 14, 2021).
 - [92] Goodyear, “Cómo conducir con sol: por qué la visión es un factor de riesgo en la conducción.”

- <https://kilometrosquecuentan.com/como-conducir-con-sol/> (accessed Oct. 25, 2021).
- [93] Ministerio de Fomento, “Norma 3.1 -Instrucción de Carreteras Trazado,” *B.O.E*, pp. 1–246, 2016, doi: 10.1017/CBO9781107415324.004.
- [94] H. & Olprod, “Entrada de mirada,” 2021. <https://docs.microsoft.com/es-es/windows/mixed-reality/develop/unreal/unreal-gaze-input> (accessed Oct. 21, 2021).
- [95] Ministerio de Fomento, “Instrucción de Carreteras 8.1 IC: Señalización vertical,” pp. 1–252, 2014.
- [96] “ClearEdge3D.” <https://www.clearedge3d.com/> (accessed Sep. 04, 2021).
- [97] Topcon, “IP-S3 HD1.”
- [98] T. School, “Unreal Engine de Epic Games: la historia del motor gráfico,” 2020. <https://www.tokioschool.com/noticias/unreal-engine-epic-games-historia/> (accessed Sep. 19, 2021).
- [99] CICE, “Qué es un render y cómo se hace.” <https://www.cice.es/blog/recursos/que-es-un-render/> (accessed Aug. 28, 2021).

10.1 Situación



 UNIVERSIDAD DE SEVILLA ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA		
APLICACIÓN DE REALIDAD VIRTUAL PARA EL ANÁLISIS DE SEGURIDAD VIAL DE CARRETERAS CON MODELOS BIM		
 Manuel Mª Benavente Lepe	Situación	Sevilla, Octubre 2021
		1:10.000
		Plano Nº 1/4

10.2 Información gráfica del Caso Estudio



UNIVERSIDAD DE SEVILLA
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA

APLICACIÓN DE REALIDAD VIRTUAL PARA EL ANÁLISIS DE
SEGURIDAD VIAL DE CARRETERAS CON MODELOS BIM

Manuel Mª Benavente Lepe

Reportaje fotográfico

Sevilla, Octubre 2021

Sin escala

Plano Nº 2/4



UNIVERSIDAD DE SEVILLA
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA

APLICACIÓN DE REALIDAD VIRTUAL PARA EL ANÁLISIS DE
SEGURIDAD VIAL DE CARRETERAS CON MODELOS BIM

Manuel Mª Benavente Lepe

Nube de Puntos

Sevilla, Octubre 2021

Sin escala

Plano N° 3/4

10.3 Escáner Láser

En cuanto al escáner láser empleado para la obtención de la nube de puntos, se trata de un escáner láser móvil cuyo vehículo de recolección es un coche. Este equipo pertenece a la empresa TOPCON, siendo en concreto el modelo IP-S3 HD1.



Figura 10-1- Modelo escáner láser IP-S3 HD1. Fuente: [97]

Este equipo emplea tres tecnologías para obtener la posición precisa del vehículo: Un receptor GNSS de frecuencia dual establece la posición geoespacial; un IMU proporciona la inclinación del vehículo; y una conexión al vehículo o un codificador externo de rueda mide la distancia recorrida [97].

El sistema IP-S3 HD1 incluye un sensor LiDAR para cubrir la carretera y su contorno hasta 100 m. Las imágenes panorámicas obtenidas mediante una cámara de 30 megapíxeles de alta resolución coleccionan imágenes en tramos de distancia ajustados [97].

Este sistema emplea el software Mobile Master Field and Office para recoger y procesar la información LiDAR georreferenciada y/o las imágenes digitales, convirtiéndolas en una colorida representación 3D la cual puede ser exportar a un software de terceros. Entre las aplicaciones de este equipo se encuentran el registro de tuberías, servicios públicos, *As-built*, monitorización del progreso de la construcción y gestión de riesgos [97].

El equipo está compuesto por:

- Láser escáner de alta definición. Captura de nubes de puntos 3D con alta resolución y densidad, proyección de datos en coordenadas globales 3D con marcas de tiempo precisas, producción de panorámicas georreferencias.
- Componente de posicionamiento.
- Codificador de la rueda del vehículo.
- Cámara esférica.

Las características técnicas del equipo son las siguientes

- IP-S3 HD1 Unidad de cronometraje.
 - o Tamaño (anchura x profundidad x altura) 260 x 160 x 121 mm
 - o Peso 3 kg
 - o Puertos de entrada/salida. Suministro de energía, Ethernet, escáner, cámara esférica, codificador de rueda, IMU, Antena GNSS
- Unidad Sensor
 - o Tamaño (anchura x profundidad x altura) 300 x 500 x 600 mm
 - o Peso 18 kg
- Receptor GNSS
 - o Seguimiento. 226 canales universales para una visión fiable, “todo a la vista”, frecuencia dual L1/L2 código/portador GPS y seguimiento GLONASS
- IMU
 - o Estabilidad del sesgo de giro 1°/h
 - o Estabilidad del sesgo de aceleración 7.5 mg
- Escáner láser
 - o Rango de medición 700.000 puntos/s
 - o Rango 100 m al 100% de reflectividad, 70 m normalmente
 - o Calibración. Calibrado Topcon
- Cámara esférica
 - o Unidad de cámara. Cámara CCD (6 pcs.)
 - o Resolución máxima. 8000 x 4000 píxeles
- Rendimiento del sistema
 - o Precisión de coordenadas absolutas
 - (1 sigma)⁶ 50 mm a 10 m
 - (2 sigma)⁷ 10 mm en superficie de carretera
 - o Tiempo de medición topográfica continua
 - 8 horas (1 TB de datos aprox.)
- Rango de temperatura del entorno
 - o Operación 0° a 45°C
 - o Almacenamiento -30° a 60°C
- Electricidad
 - o Voltaje de entrada 9V a 36V
 - o Energía 60W

⁶ Comparación con 10 puntos conocidos, 30 pasadas a 30 km/h precisión de superficie.

⁷ Resultado de ajuste de planos en una superficie de carretera plana

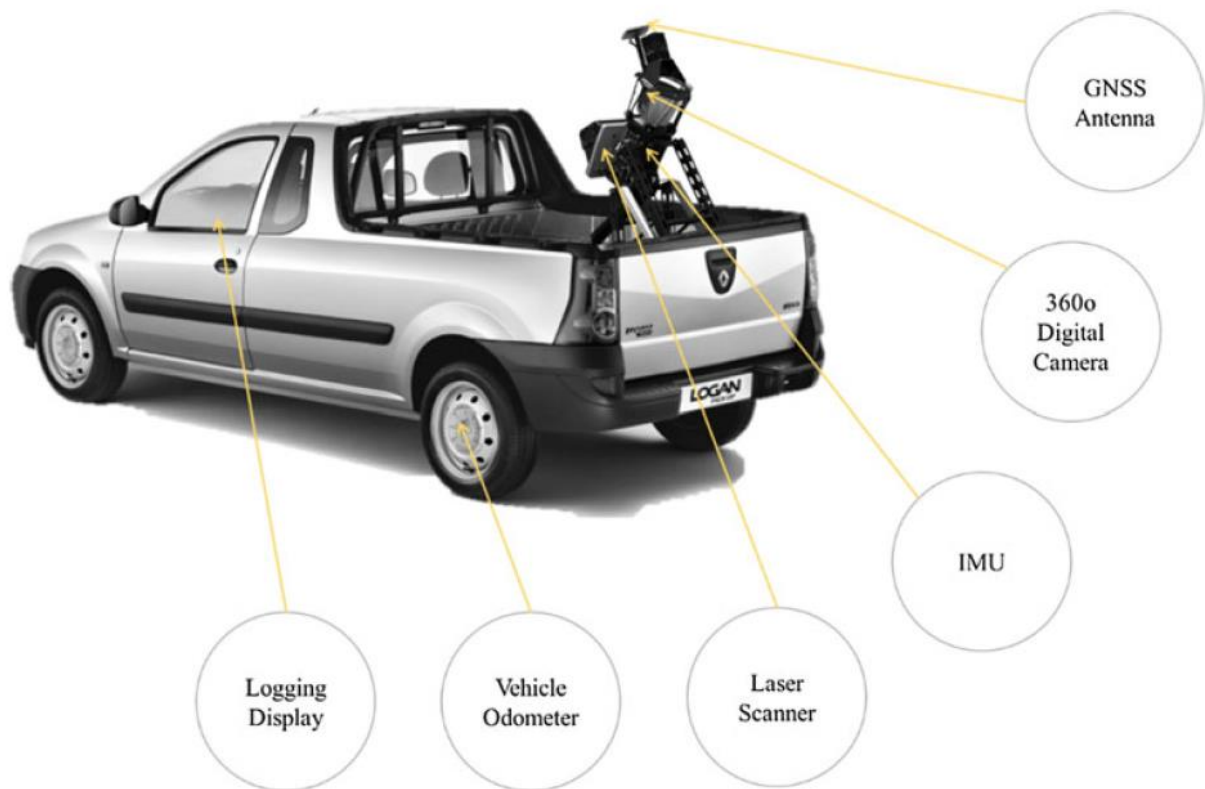
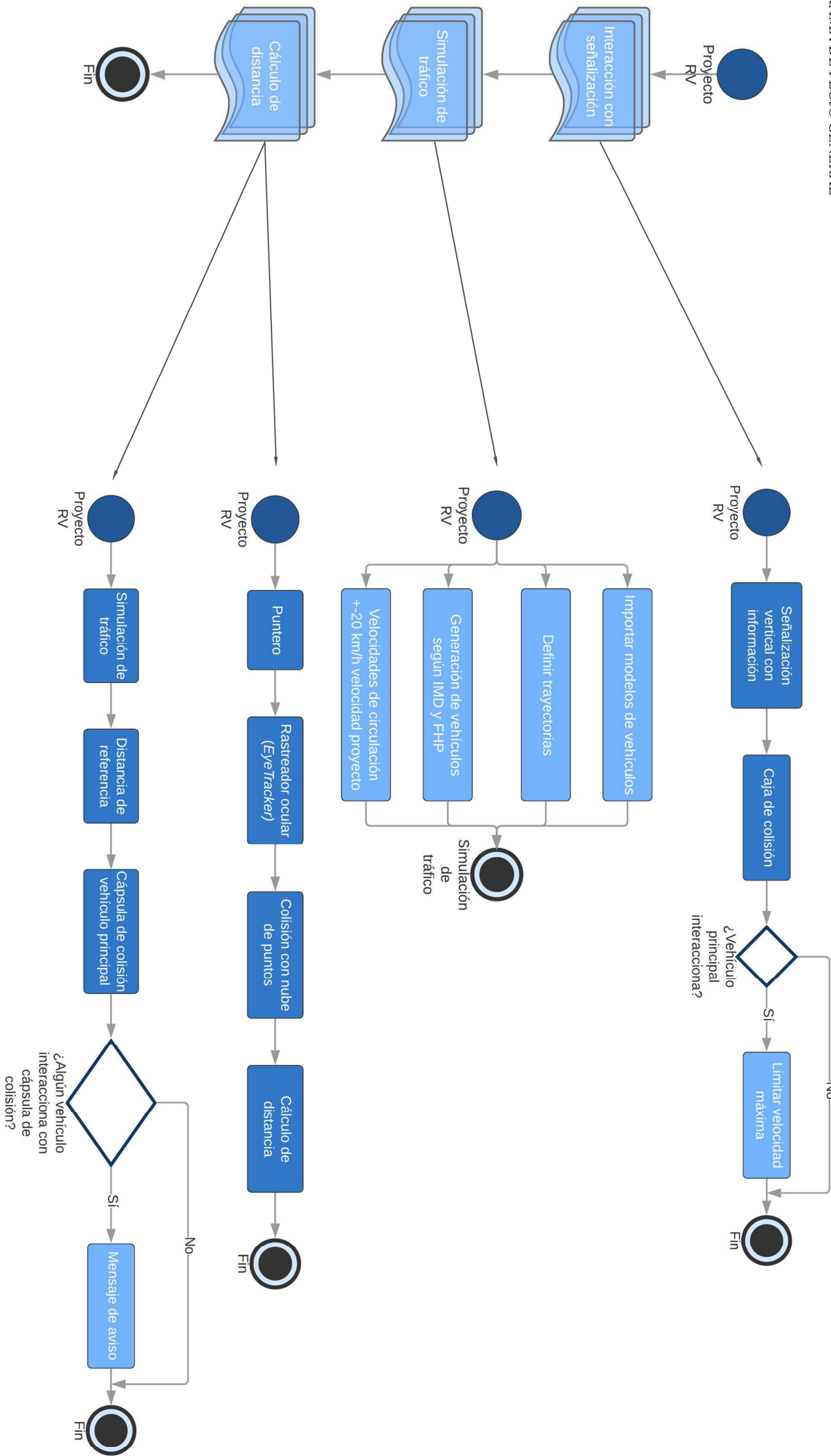


Figura 10-2- Plataforma de un sistema de escáner láser móvil (*Topcon IP-S3 HD 3D mobile mapping system*).
Fuente: [23]

10.4 Arquitectura de la Herramienta RV-SegVial

DIAGRAMA DE FLUJO GENERAL



10.5 Herramienta UNREAL ENGINE

Unreal Engine es un motor de creación de entornos virtuales gratuito el cual posee herramientas para el diseño y la creación de cualquier entorno creativo. Este motor fue creado por la compañía Epic Games en 1998 y su funcionamiento se basa en el lenguaje de programación C++ [98].

La principal utilidad de este software es la creación de videojuegos. Sin embargo, entre sus múltiples funciones y utilidades destacan su aplicación a la ingeniería, la arquitectura, la realidad virtual y el diseño 3D.

La versión estable de este software actualmente es *Unreal Engine 4* aunque ya se puede tener un acceso a la versión *Unreal Engine 5*. Además, es conveniente destacar *Twinmotion*, el cual permite crear renders de gran calidad.

10.5.1 Descarga

Como se ha mencionado anteriormente, este software fue creado por Epic Games. Esto implica que para poder descargar *Unreal Engine* y empezar a trabajar con él, es necesario registrarse en la plataforma de Epic Games.

Una vez realizado este registro, se puede acceder a dos licencias:

- Licencia de publicación. Esta licencia es la que emplean empresas que publican el material producido y generan ingresos con él. Por ejemplo, sería el caso de una empresa creadora de videojuegos que, en vez de usar un motor propio, emplea *Unreal Engine*. El precio de esta licencia es de un 5% de los derechos de autor cuando el producto tenga éxito. También añade que el primer millón de dólares de ingresos brutos de por vida del producto generado por la empresa está exento de derechos de autor.
- Licencia de creador (recomendada). Esta licencia permite tener acceso a software sin necesidad de derechos de autor. Se enfoca hacia aquellos usuarios cuyo empleo de este software no tiene un fin monetario.

Con este proceso se descarga el *Epic Games Launcher*, en el cual se puede acceder a la pestaña con el nombre *UE4* para descargar el software.

Una vez descargado el software, el aspecto del *Epic Games Launcher* es el siguiente. Se puede observar en la parte superior derecha de la ventana que ya aparece la opción de iniciar *Unreal Engine 4*. Para el desarrollo del presente TFM se empleará la versión *Unreal Engine 4.26.1* y la 4.24.3.

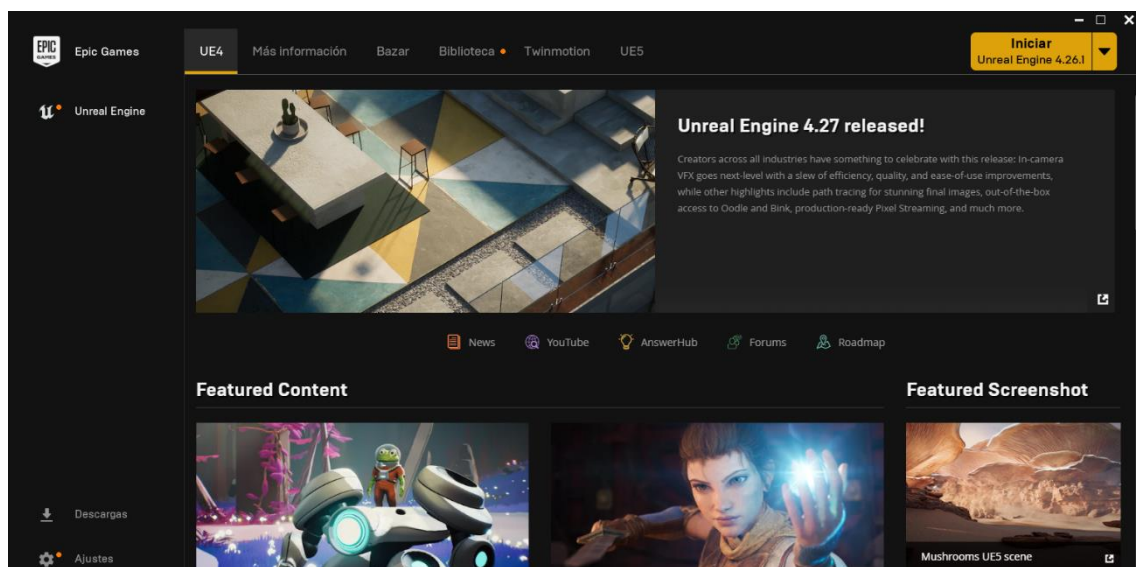


Figura 10-3- *Epic Games Launcher*

10.5.2 Inicio

Tras haber realizado la descarga del *Epic Games Launcher* y la instalación del programa, el siguiente escalón es empezar a desarrollar un proyecto. Una vez se inicia el programa, la ventana que aparece es la siguiente.

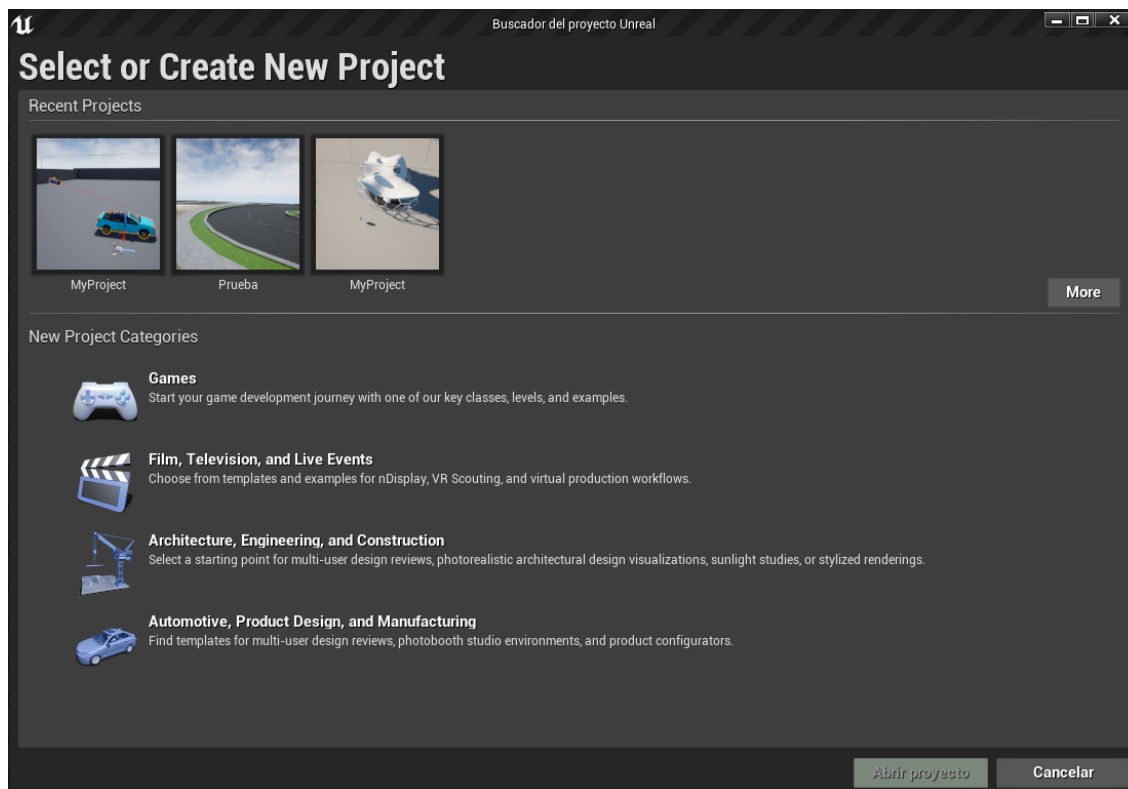


Figura 10-4- Creación de un nuevo proyecto en *Unreal Engine 4*

En la parte superior se muestran los proyectos con los que el usuario está trabajando. Luego, en la parte inferior aparecen diferentes categorías en función de la utilidad con la que se pretende usar el software. En función de la categoría que se seleccione, aparecerán diferentes plantillas. Estas plantillas permiten reducir en gran medida el trabajo inicial del usuario para crear la escena.

Se desarrollan a continuación las siguientes categorías por ser las más interesantes en el presente TFM *Juegos; Arquitectura, ingeniería y construcción; Automoción, diseño del producto y fabricación*. Dentro de estas categorías, se analizan las plantillas que son de gran interés dentro del sector AEC.

- Juegos. Esta categoría presenta varias plantillas como, por ejemplo:
 - Third Person. Esta plantilla presenta un personaje jugable donde la cámara se posiciona detrás y ligeramente arriba del personaje. Cuando el personaje se mueve, usando por ejemplo el teclado del equipo, la cámara lo sigue. Asimismo, la posición de la cámara se puede adaptar en función del objetivo.
 - Handheld AR. Esta plantilla se emplea para crear aplicaciones de Realidad Aumentada en dispositivos Android e iOS. Incluye la lógica de ejecución para activar y desactivar el modo AR, información de depuración relativa a la detección de planos, código de ejemplo para la detección de golpes y manejo de la estimación de la luz.
 - Vehicle. Esta plantilla presenta las físicas de un vehículo en movimiento. El movimiento del vehículo puede controlarse, por ejemplo, con el teclado. La plantilla tiene dos cámaras, una posicionada atrás y sobre el vehículo mientras que la otra está posicionada en el interior del vehículo. También se muestra la marcha engranada y la velocidad a la que circula el vehículo.

- Virtual Reality. Esta plantilla se emplea para crear entornos de realidad virtual en los que el usuario interacciona con el entorno a través de un equipo formado por dos controladores y las gafas de realidad virtual, como sería el caso de las Oculus Quest 2.
- Vehicle Advanced. Esta plantilla incluye un vehículo más complejo que el de la plantilla *Vehicle*. Al igual que ella, posee dos cámaras. Cuando se utiliza la cámara interior, se puede observar hacia el exterior. En este caso, se ha añadido el efecto de la suspensión del vehículo junto con el sonido del motor.
- Arquitectura, ingeniería y construcción. Esta categoría presenta las siguientes plantillas.
 - Archvis. Esta plantilla está dedicada a trabajos de visualización arquitectónica con ejemplos para estudios de posicionamiento respecto al sol, renders de interiores ...
 - Hololens Viewer. Con esta plantilla se permite la navegación e interacción para las Hololens. Sirve de punto de partida para proyectos industriales o arquitectónicos colaborativos.
 - Collab Viewer. Al igual que la anterior, esta plantilla sirve de punto de partida para proyectos industriales o arquitectónicos colaborativos. Además, permite la navegación e interacción para varias plataformas como ordenadores de escritorio o realidad virtual.
- Automoción, diseño del producto y fabricación. Esta categoría presenta varias plantillas como, por ejemplo:
 - Hololens Viewer. Con esta plantilla se permite la navegación e interacción para las Hololens. Sirve de punto de partida para proyectos industriales o arquitectónicos colaborativos.
 - Collab Viewer. Al igual que la anterior, esta plantilla sirve de punto de partida para proyectos industriales o arquitectónicos colaborativos. Además, permite la navegación e interacción para varias plataformas como ordenadores de escritorio o realidad virtual.

Además, también existe la plantilla de trabajo en blanco, en la que no se encuentra ningún elemento predefinido cuando se inicia el proyecto. Una vez seleccionada la plantilla que más se adapta al objetivo buscado, el siguiente paso es la definición de los ajustes del proyecto.

En el caso más general, que sería la categoría *Juegos*, los ajustes a definir son los siguientes:

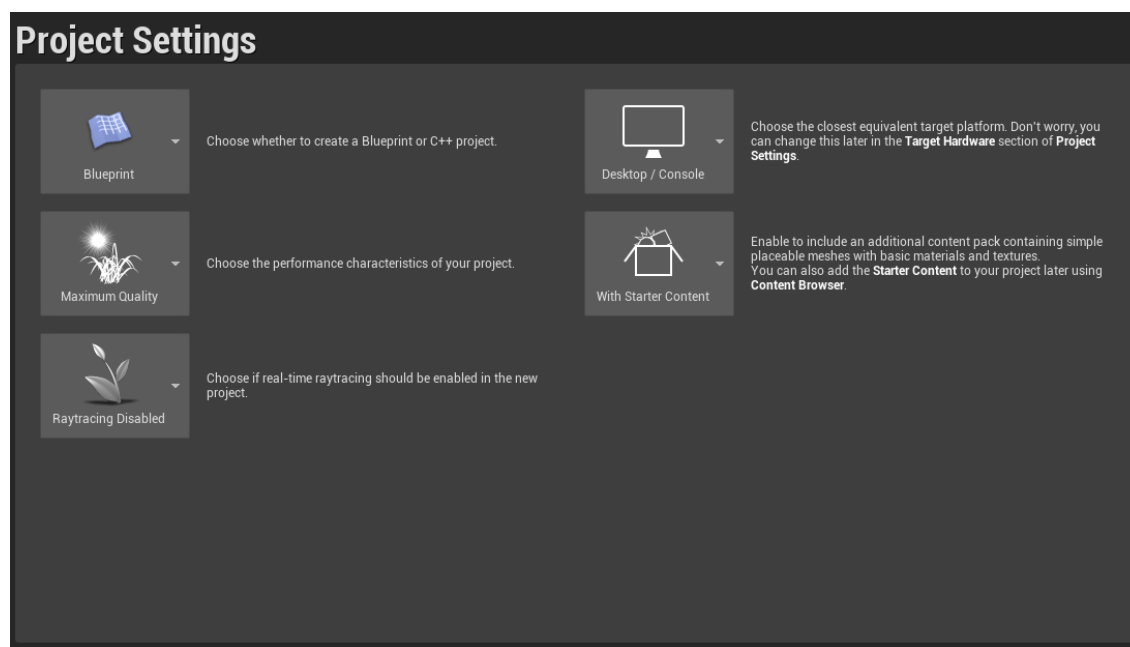


Figura 10-5- Ajustes del proyecto en *Unreal Engine 4*

Comenzado por la primera columna desde la fila superior y terminando con la segunda columna, se tiene lo siguiente:

- Blueprint o C++. En primer lugar, se define si se quiere crear un proyecto donde el tipo de programación a emplear sea con Blueprint o con C++.
- Maximum quality o Scalable 2D o 3D. Se elige las características de rendimiento del proyecto.

- Raytracing Disabled o Enabled. Se activa o desactiva la opción de generar sombras a tiempo real.
- Desktop/Console o Mobile/Tablet. Se elige la plataforma objetivo equivalente. Esta opción se puede modificar más tarde en la sección *Target Hardware* dentro de la pestaña *Project Settings*.
- Con/Sin contenido inicial. Sirve para determinar si se incluye un pack de contenido inicial con mallas simples con materiales y texturas básicas.

Una vez definidos estos ajustes, el siguiente paso es iniciar el proyecto para comenzar a trabajar en él y desarrollar la aplicación objetivo.

